



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tomáš Adámek

Odezva hadronového kalorimetru ATLAS/Tilecal

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2019

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

Podpis autora

Týmto by som chcel vyjadriť veľkú vďaku vedúcemu bakalárskej práce doc. RNDr. Tomášovi Davídkovi, Ph.D. za ochotnú pomoc a strpenie pri jej vypracovaní.

Názov práce: Odezva hadronového kalorimetru ATLAS/Tilecal

Autor: Tomáš Adámek

Ústav: Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedúci bakalárskej práce: doc. RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D., Ústav částicové a jaderné fyziky

Abstrakt: Tilecal je hadronový kalorimeter pokrývajúci centrálnu časť experimentu ATLAS, ktorý je jeden zo štyroch najvýznamnejších experimentov na najväčšom existujúcom protónovom urýchľovači (LHC) v CERN-e. Hlavnou oblasťou výskumu v tejto bakalárskej práci je preskúmať energetickú odozvu a rozlíšenie testovaných modulov na elektróny. Ďalej je cieľom práce vykonanie korekcie na energetickú odozvu s ohľadom na periodickú štruktúru bunky kalorimetra Tilecal.

Kľúčové slová: ATLAS CERN Tilecal kalorimeter odozva

Title: Response of the ATLAS Tile Calorimeter

Author: Tomáš Adámek

Institute: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: doc. RNDr. Tomáš Davídek, Ph.D., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: TileCal is the Hadronic calorimeter covering the most central region of the ATLAS experiment which is one of the four major experiments at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN. Main area of interest of this bachelor thesis is to examine the energy response and resolution of tested modules to electrons. Furthermore, the goal of this work is to make correction to the energy response with respect to the periodic structure of TileCal's cell.

Keywords: ATLAS CERN Tilecal calorimeter response

Obsah

Úvod	3
1 Veľký hadrónový urýchľovač v CERN	4
1.1 CERN	4
1.2 LHC	5
1.2.1 Technológia	5
1.2.2 Zrážky častíc	6
1.2.3 Detektory a experimenty	6
2 Experiment ATLAS	7
2.1 Vnútrotný detektor	7
2.2 Systém kalorimetrov	9
2.3 Miónové komory	10
2.4 Systém triggerov	10
3 Hadrónový kalorimeter Tilecal	12
3.1 Popis priestorového rozloženia kalorimetru Tilecal	12
3.2 Konštrukcia detektoru Tilecal	12
4 Experimentálne usporiadanie a použité dáta	15
4.1 Experimentálne usporiadanie	15
4.1.1 Čerenkove detektory	16
4.1.2 Scintilačné detektory a zväzkové komory	16
4.2 Použité dáta	16
5 Výber udalostí	18
5.1 Výber udalostí predradenými detektormi	18
5.1.1 Použitie zväzkových scintilačných detektorov	18
5.1.2 Použitie zväzkových komôr	19
5.1.3 Použitie Čerenkovych počítačov	20
5.2 Výber elektrónov	20
5.2.1 Orezanie miónov	20
5.2.2 Orezanie hadrónov	22
6 Odozva a energetické rozlíšenie kalorimetra	25
6.1 Odozva kalorimetra na elektróny	25
6.2 Oscilácia signálu	25
6.3 Uniformita odozvy	27
6.4 Perióda štruktúry	28
6.5 Linearita energetickej odozvy kalorimetra	28
6.6 Rozlíšenie detektora	29
6.7 Vylepšenie rozlíšenia kalorimetra	30
Záver	33
Seznam použité literatury	34

Zoznam obrázkov	36
A Prílohy	37
A.1 Oscilácia signálu	37

Úvod

V roku 1954 bola založená Európska organizácia pre jadrový výskum, CERN. Hlavnou oblasťou jej výskumu je dnes časticová fyzika, ktorá sa zaoberá fundamentálnymi zložkami hmoty a ich vzájomnou interakciou. Experiment ATLAS je jeden zo štyroch najväčších experimentov na LHC. Jednou z hlavných úloh tohto experimentu je umožniť fyzikom otestovať predikcie Štandardného modelu, ktorý reprezentuje naše súčasné chápanie zloženia hmoty a interakcií medzi subatomárnymi časticami. Hadrónový kalorimeter Tilecal je jednou z kľúčových súčastí experimentu ATLAS.

Experiment ATLAS v ostatných rokoch prešiel modernizáciou a testami, okrem iného, novej elektroniky pre hadrónový kalorimeter. V rokoch 2016 a 2017 prebehli testy modulov kalorimetra Tilecal na zväzkoch častíc s definovanou hybridnosťou, ktoré sa v súčasnej dobe stále analyzujú.

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zoznámiť sa so základmi spracovania týchto experimentálnych dát a vyhodnotiť odozvu, uniformitu, linearitu a energetické rozlíšenie kalorimetra na elektróny. V nadväznosti na tieto časti práce bola vykonaná aj korekcia signálu s cieľom zlepšiť rozlíšenie kalorimetra.

Text práce je rozčlenený do šiestich kapitol. Prvé tri kapitoly sú venované úvodu do problematiky a popisu CERN-u, experimentu ATLAS a hadrónového kalorimetra Tilecal. Sú tu prezentované niektoré základné princípy fungovania kalorimetra a naznačená štruktúra jeho modulov.

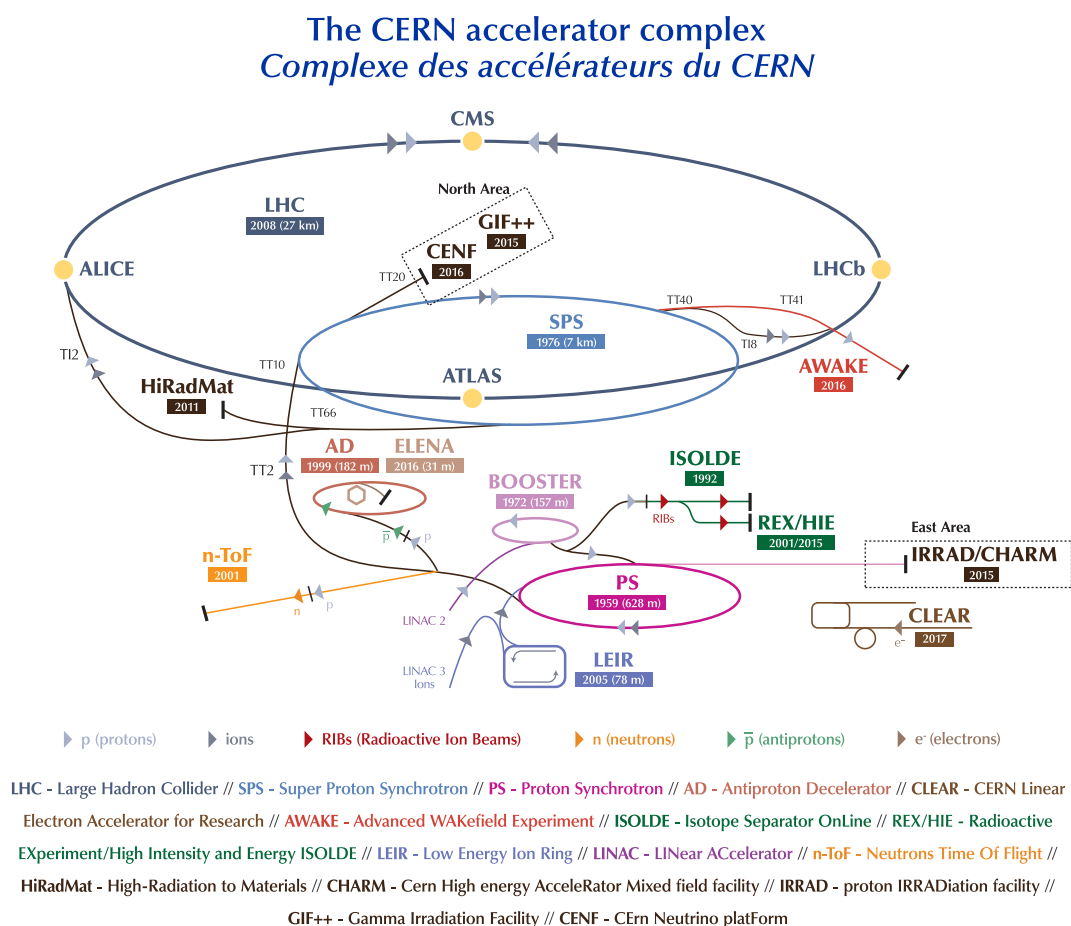
Štvrtá kapitola obsahuje popis experimentálneho usporiadania testov a popis použitých dát. V piatej kapitole sa nachádza podrobný popis postupu separácie vhodných elektrónov z testovacieho zväzku. V prvej časti kapitoly je popísaný výber požadovaných udalostí pomocou Čerenkovych počítačov, scintilačných detektorov a zväzkových komôr. V druhej časti kapitoly je uvedený spôsob rozlíšenia udalostí spôsobených elektrónmi, miónmi a hadrónmi. V šiestej kapitole sa nachádzajú samotné výsledky analýzy experimentálnych dát. V tejto časti textu je zhrnutý postup, ako aj získané výsledky, pri určovaní energetickej odozvy kalorimetra, uniformity a linearity tejto odozvy, rozlíšenia kalorimetra a v neposlednom rade korekcie energetického rozlíšenia.

1. Veľký hadrónový urýchľovač v CERN

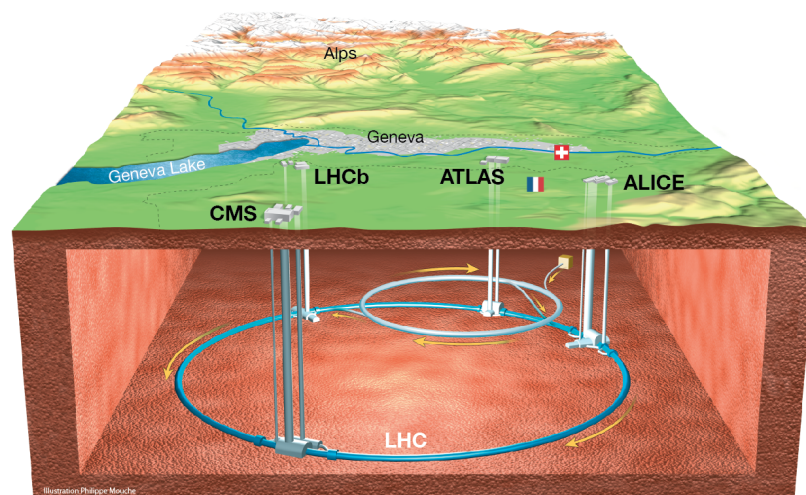
1.1 CERN

V roku 1954 bola založená Európska organizácia pre jadrový výskum, CERN. Primárnym cieľom tejto inštitúcie bolo dostať európsku vedu na svetovú úroveň v oblasti jadrovej fyziky. Hlavnou oblasťou výskumu je dnes časticová fyzika, ktorá sa zaoberá fundamentálnymi zložkami hmoty a ich vzájomnou interakciou.

Laboratórium využívajúce sústavu urýchľovačov a detektorov častíc (viď obrázky 1.1 a 1.2) sa nachádza na francúzsko-švajčiarskej hranici, neďaleko Ženevy. Na prevádzke sa podieľa 22 členských štátov. Československo sa k organizácii pridalo v roku 1992 a následne s CERN-om obe republiky obnovili spoluprácu v roku 1993 po rozpade Československa [1].



Obr. 1.1: Systém urýchľovačov v CERN-e [2]. Najväčšia, tmavomodrá, elipsa znázorňuje LHC a žlté body na nej znázorňujú štyri najvýznamnejšie experimenty na LHC.



Obr. 1.2: Ilustrácia polohy a veľkosti LHC [5]. Na obrázku je znázornené francúzsko-švajčiarske pohraničie, Ženeva a štyri najvýznamnejšie experimenty na LHC.

1.2 LHC

Veľký hadrónový urýchľovač, LHC (z anglického The Large Hadron Collider), je najväčší urýchľovač častíc na svete. Svojim typom sa jedná o kruhový urýchľovač, konkrétne synchrotrón¹. Merajúc 27 km v obvode sa celou svojou dĺžkou nachádza v priemere 100 m pod zemou (viď obrázok 1.2)[3]. Svoju činnosť spustil 10. Septembra 2008 a stal sa tak posledným doplnením komplexu urýchľovačov v CERN-e (porovnaj s obrázkom 1.1) [4].

LHC tvorí prstenec supravodivých magnetov pozostávajúci najmä z dipólových magnetov, ktoré ohýbajú zväzok a kvadrupólových magnetov, ktoré zväzok fokusujú. Tieto sú chladené supratekutým héliom, napríklad v prípade dipólov na pracovnú teplotu 1,9 K. Maximálne magnetické pole vyvinuté v LHC je 7,74 T [3].

1.2.1 Technológia

Pred tým, ako zväzok častíc vstúpi do LHC, musí prejsť celým radom urýchľovačov z komplexu na obrázku 1.1, z ktorých každý urýchli častice zväzku na vyššiu energiu ako ten predchádzajúci. Napríklad v prípade protónov je tento postup nasledovný (bledosivá šípka na obrázku 1.1) [3]:

Protóny sú získavané z atómov vodíku oddelením elektrónov. Lineárny urýchľovač LINAC2 urýchli zväzok na 50 MeV a vpraví ho do Boostera. Ten zvýši energiu častíc až na 1,4 GeV a ďalej ich predá do Proton Synchrotronu (PS). Tam sú protóny ďalej urýchlené na 25 GeV a postupujú do Super Proton Synchrotronu (SPS). V SPS sa zvýši energia zväzku až na 450 GeV a nakoniec sú častice vypravené do LHC.

¹Častice obiehajú po kruhovej dráhe s konštantným polomerom.

Urýchľovaním po dobu zhruba 20 min dosiahnu energie až 6,5 TeV. Protóny následne niekoľko hodín obieľajú v urýchľovači.

Pri prevádzke je kľúčové zabrániť neželaným zrážkam urýchľovaných častíc s časticami vzduchu. Na tento účel je vybudovaný vákuový systém, ktorý udržuje zväzok v ultra-vysokom vákuu s tlakom 10^{-13} atm [3].

Protóny zväzku obieľajú v synchrotróne zoskupené v tzv. balíčkoch. Je to priamy dôsledok spôsobu urýchľovania častíc. Oscilujúce elektrické pole, vytvorené pozdĺž evakuovaných RF² dutín, v ktorých sa pohybujú protóny, je generované o veľkosti 5 MV/m a frekvencii 40 MHz [3]. To definuje rozstup balíčkov o veľkosti 25 ns (7,5 m).

1.2.2 Zrážky častíc

V LHC sa zväzky častíc pohybujú v oboch smeroch - v smere aj proti smeru hodinových ručičiek. Táto konštrukcia umožňuje vzájomné zrážky urýchľovaných zväzkov³. Výhodou oproti urýchľovačom, v ktorých častice narážajú do fixného terča je oveľa vyššia energia zrážky. Táto energia je ďalej využiteľná napríklad na produkciu nových častíc.

V oboch prípadoch sa jedná o tzv. ťažiskovú energiu. Zatiaľ čo v prípade vzájomnej zrážky dvoch zväzkov rastie ťažisková energia E_{CM} so súčtom energií zväzkov:

$$E_{CM} = E_1 + E_2, \quad (1.1)$$

v prípade fixného terča rastie ťažisková energia s odmocninou z energie urýchľovaných častíc:

$$E_{CM} \propto \sqrt{E}. \quad (1.2)$$

1.2.3 Detektory a experimenty

V súčasnosti je na LHC v prevádzke celkom sedem experimentov, ktoré využívajú rôzne druhy detektorov na analyzovanie produktov zrážok častíc popísaných v stati 1.2.2. Tieto experimenty sú navzájom nezávislé a vyznačujú sa dedikovanou sadou detektorov. Najväčšie z nich sú univerzálne detektory ATLAS a CMS. Spolu so špecializovaným detektormi ALICE a LHCb sú znázornené na obrázku 1.2.

²Z anglického Radiofrequency.

³Preto je v anglickom originály collider (zrážač) na rozdiel od českého/ slovenského prekladu, v ktorých je urýchľovač (accelerator).

2. Experiment ATLAS

Ako bolo uvedené v stati 1.2.3 je experiment ATLAS jeden zo štyroch najväčších experimentov na LHC. Jednou z hlavných úloh tohto experimentu je umožniť fyzikom, precíznymi meraniami, otestovať predikcie Štandardného modelu, ktorý reprezentuje naše súčasné chápanie zloženia hmoty a interakcií medzi subatomárnymi časticami.

ATLAS je detektor valcového tvaru, vážiaci asi 7000 t a merajúci 46 m na dĺžku a 25 m v priemere, viď obrázok 2.1 [6].

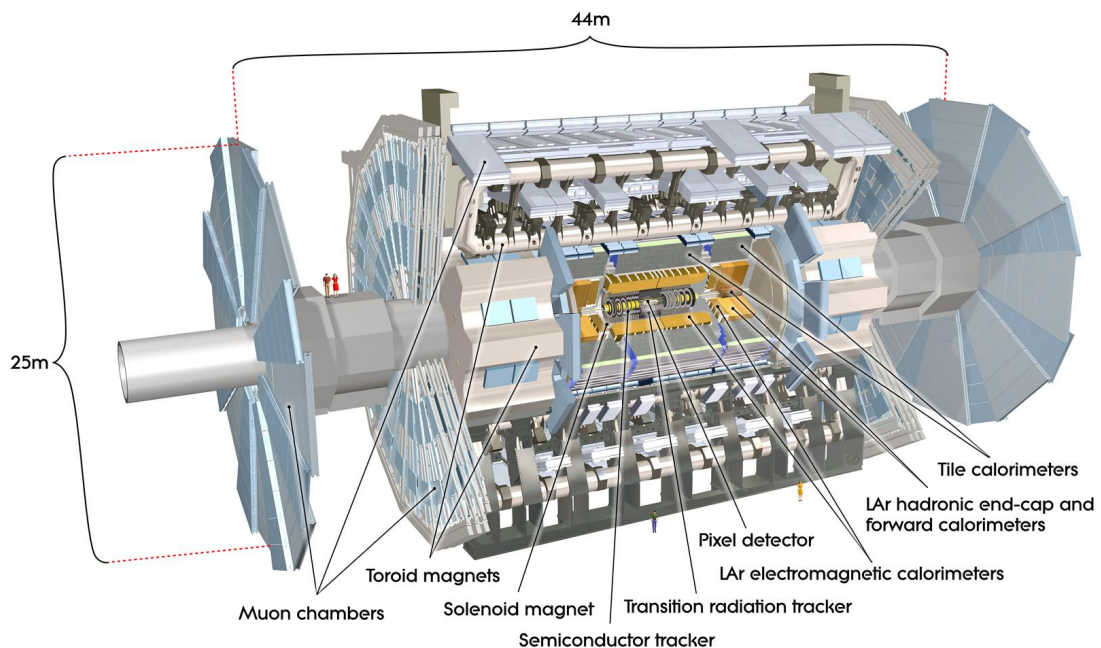
Ako je badateľné z obrázku 2.1, detektor ATLAS tvorí sústava mnohých komponentov. V strede detektora sa nachádza tzv. vnútorný detektor. Postupne potom v radiálnom smere nachádzame elektromagnetický a hadrónový kalorimeter a na koniec miónové komory. Dôležitou súčasťou samotného detektora je aj systém triggerov na výber prípadov.¹

Jednotlivé detektory sú navrhnuté tak, aby v nich interagovali špecifické častice. Poradie a kombinácia týchto detektorov je potom volená so zreteľom na to, aby sme v konečnom dôsledku dostali čo najviac informácií o produktoch zrážok viď obrázok 2.2.

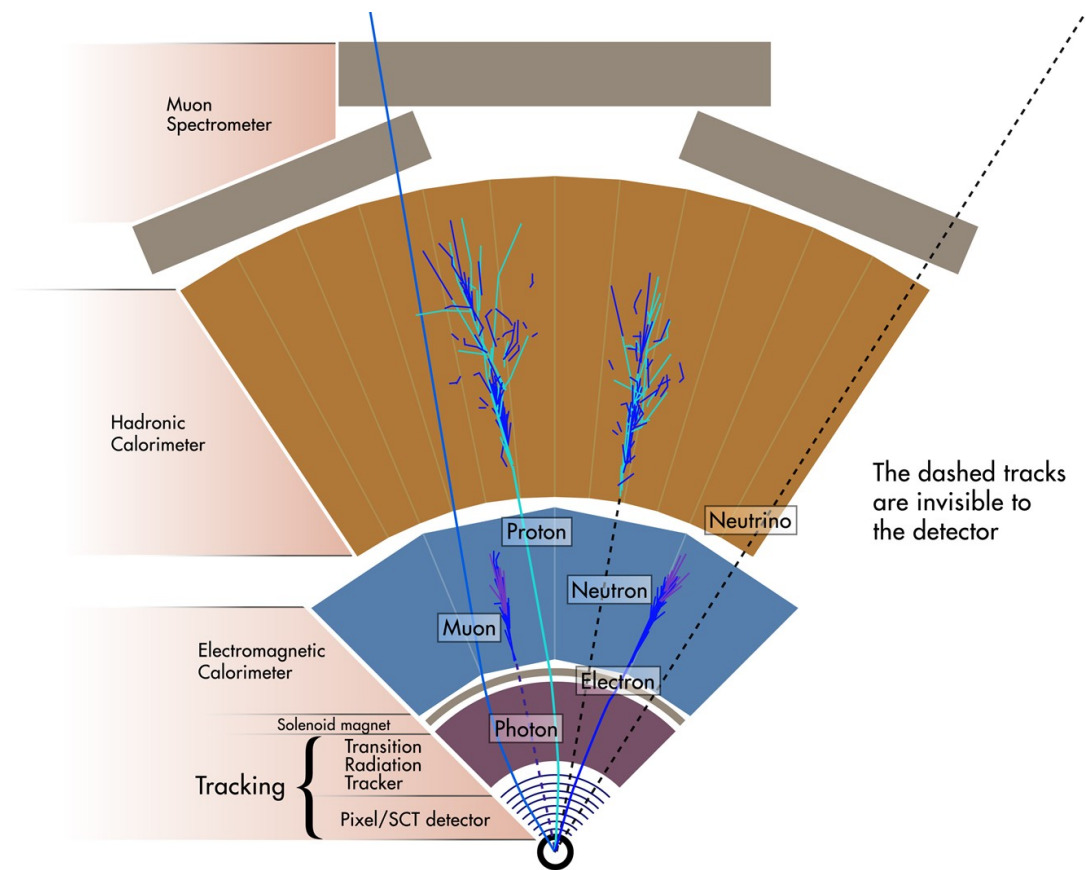
2.1 Vnútorný detektor

Stred ATLAS-u tvorí vnútorný detektor. Tomu, že to je prvý technický celok, ktorým skúmame produkty zrážok na LHC, zodpovedajú parametre, ktoré sme na tejto úrovni schopní o produktoch zrážok zistiť. Pomocou pixelových a stripových

¹Toto bol iba zoznam najzákladnejších častí detektora ATLAS.



Obr. 2.1: Ilustrácia detektora atlas, jeho súčastí a rozmerov [7].



Obr. 2.2: Schematická ilustrácia interakcie častíc v rôznych častiach detektoru atlas. Znázornené sú fotóny a elektróny, ktoré vytvárajú elektromagnetické spršky rozvíjajúce sa najmä v elektromagnetickom kalorimetri. Protóny a neutróny, ktoré vytvárajú hadrónové spršky rozvíjajúce sa najmä v hadrónovom kalorimetri. Mióny a neutrína, ktoré prechádzajú všetkými časťami detektora. Dráhy častíc s nenulovým elektrickým nábojom sú znázornené plnou čiarou a dráhy neutrálnych častíc sú znázornené prerušovanou čiarou. Nabité častice majú zakrivenú trajektóriu v magnetickom poli solenoidu. Originál obrázka je prevzatý z [8] a použitý je negatív.

polovodičových detektorov vieme určiť trajektórie produktov rozpadu. Externým magnetickým poľom², paralelným s osou zväzku, sme navyše schopní, na základe zakrivenia trajektórie, určiť znamienko elektrického náboja a priechu hybnosť \vec{p}_T ³ produktov rozpadu, viď obrázok 2.2. Dodatočnú informáciu o detegovaných časticach nám poskytuje detektor prechodového žiarenia (TRT). TRT napríklad pomáha rozlíšiť elektróny od piónov [9]. Z princípu fungovania pixelových a polovodičových detektorov je zrejmé, že vnútorný detektor môže zaznamenať iba častice s nenulovým elektrickým nábojom.

2.2 Systém kalorimetrov

Keď sa posunieme v detektore ATLAS, v radiálnom smere, od osi zväzku, za vnútorný detektor, príde na rad systém kalorimetrov, viď obrázok 2.3. Kalorimetre v časticovej fyzike slúžia na meranie energie a smeru častíc pri prechode skrz ich materiál, pričom by sa častice v kalorimetri mali pohltiť a predať mu celú svoju energiu. Dôležitý rozdiel oproti vnútornému detektoru je v tom, že kalorimetrami je možné merať aj elektricky neutrálne častice. Systém kalorimetrov pozostáva z dvoch hlavných častí: elektromagnetického kalorimetra a hadrónového kalorimetra, viď obrázky 2.2 a 2.3.

V elektromagnetickom kalorimetri sú detegované častice, ktoré s hmotou interagujú najmä elektromagneticky. Ak má elektrón dostatočne vysokú energiu⁴, stráca energiu predovšetkým brzdným žiarením. Fotóny pri takýchto energiách strácajú energiu predovšetkým produkciou párov. V materiály kalorimetra sa teda týmto spôsobom vytvára elektromagnetická spíška, viď obrázok 2.2.

Pozdĺžny profil elektromagnetickej spíšky je dobre popísateľný funkciou:

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}, \quad (2.1)$$

kde a , b sú parametre modelu, $\Gamma(a)$ je Gama funkcia a E_0 je pôvodná energia častice [10].

V hadrónovom kalorimetri hrá významnú rolu silná interakcia. Vysokoenergetické hadróny interagujú s hmotou za vytvorenia hadrónovej spíšky, viď obrázok 2.2, ktorá má aj elektromagnetickú zložku. Na rozdiel od elektromagnetickej spíšky má hadrónová spíška väčšiu penetračnú hĺbku, širší profil a kvôli fluktuáciám nie je tak dobre popísateľná ako elektromagnetická spíška. Na tomto princípe je možné rozlíšiť častice, ktoré interagujú elektromagneticky a častice, ktoré interagujú silnou interakciou.

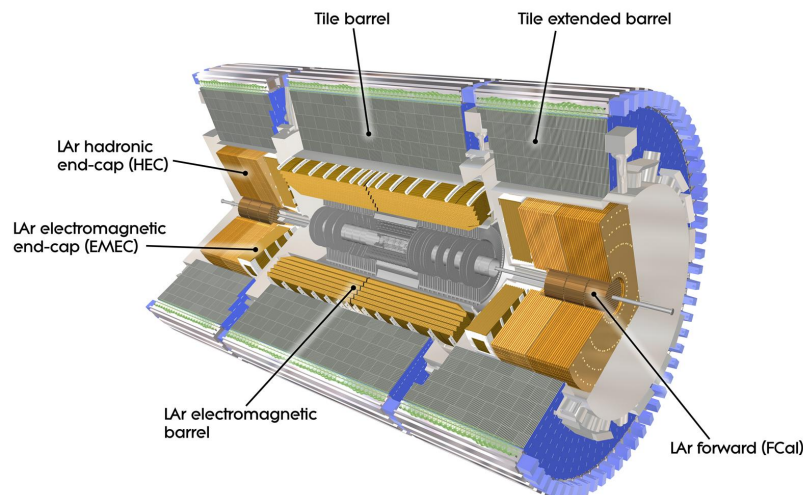
Oba kalorimetre sú tzv. sendvičového⁵ typu, čo znamená, že pozostávajú z pasívnej a aktívnej časti. Pasívnu časť (absorbátor) tvorí materiál o vysokej hustote, kde dochádza k interakcii skúmaných častíc s časticami materiálu absorbátora. V pasívnom prostredí je deponovaná prevažná časť energie skúmaných častíc. Aktívnu časť tvoria napríklad ionizačné detektory alebo scintilátory a slúži na zber signálu, ktorý je úmerný energii pôvodnej častice.

²Toto magnetické pole je produkované solenoidálnym magnetom, viď obrázok 2.1 - *Solenoid magnet*.

³Priečna hybnosť je zložka vektoru hybnosti v smere kolmom na os zväzku.

⁴Podľa [10] je táto hranica asi 100 MeV.

⁵angl.: sampling



Obr. 2.3: Ilustrácia prierezu systému kalorimetrov [12]. Znázornený je Hadrónový kalorimeter (modrá, sivá) a elektromagnetický kalorimeter (zlatá).

Elektromagnetický kalorimeter (LAr) je sendvičový kalorimeter s tekutým argónom⁶ chladeným na teplotu $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11].

Hadrónový kalorimeter (Tilecal) používa ako aktívne médium plastové scintilátory a ako absorbátor oceľ [11].

2.3 Miónové komory

Mióny v kalorimetri strácajú energiu predovšetkým ionizáciou. Materiál kalorimetrov väčšinou je väčšinou schopný zachytiť iba malú časť energie miónov produkovaných v zrážkach. Navyše, zo zakrivenia dráhy miónu v magnetickom poli je možné určiť jeho hybnosť. Na efektívne získanie informácií o týchto časticách je žiadúce použiť ďalšie detekčné zariadenie. Týmto detektorom je tzv. miónový spektrometer, ktorý pozostáva z veľkého počtu miónových komôr.

Detekcia miónov je založená na princípe ionizačnej komory. Magnetické pole nám, podobne ako v prípade vnútorného detektora, umožňuje určiť priečnu hybnosť týchto častíc a znamienko náboja.

2.4 Systém triggerov

Kvôli komplexnému systému detektorov popisovanému v predchádzajúcich podkapitolách 2.1 až 2.3 a faktu, že počet protón-protónových zrážok v detektore ATLAS sa môže vyšplhať až na miliardu za sekundu, je nutné spracovať zodpovedajúce množstvo dát, až $6 \cdot 10^7$ MB/s [13].

Je prakticky nevyhnutné redukovať takýto obrovský dátový tok a keďže nie všetky informácie získané pri kolíziách sú pre ďalší výskum zaujímavé, ponúka sa ako spôsob redukcie systém triggerov. Tento systém selektuje spomedzi všetkých dát udalosti s požadovanými vlastnosťami.

⁶Odtiaľ pochádza aj skratka LAr (z anglického Liquid Argon Calorimeter)

Systém triggerov sa skladá z troch úrovní. Level-1-Trigger je založený na koincidencii kalorimetra a miónového detektoru. Level-2-Trigger je systém procesorov analyzujúcich výsledky z predchádzajúcej úrovne. V tretej úrovni, Level-3-Trigger prebieha detailná analýza zvyšku dát, ktorý prešiel prvými dvomi úrovňami. Trigger je takto schopný z pôvodnej miliardy udalostí vybrať stovku fyzikálne zaujímavých udalostí každú sekundu. [13]

3. Hadrónový kalorimeter Tilecal

3.1 Popis priestorového rozloženia kalorimetru Tilecal

V experimentálnej časticovej fyzike je často potrebné uvažovať uhol odklonu od osi kolidujúceho zväzku častíc. Pre popis tohto uhlu zavádzame veličinu η , zvanú pseudorapidita, ktorá je definovaná vzťahom:

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right], \quad (3.1)$$

kde θ je uhol medzi vektorom hybnosti častice po zrážke a kladným smerom osi zväzku.

Na strane druhej, pre popis azimutálneho uhlu v rovine kolmej na os zväzku, používame štandardnú definíciu a značíme ho ϕ .

3.2 Konštrukcia detektoru Tilecal

Ako odznelo v podkapitole 2.2, Tilecal je hadrónový kalorimeter na experimente ATLAS. Nachádza sa v jeho centrálnej časti, konkrétnejšie v oblasti s $|\eta| \leq 1,7$ [14]. Pozostáva z troch valcovitých častí: centrálneho barelu, tzv. long barrel, a dvoch postranných barelov, tzv. extended barrel, porovnaj s obrázkom 2.3. Každý valec je tvorený 64 modulmi pokrývajúcimi oblasť s azimutálnym uhlom:

$$\Delta\phi = 2\pi/64 = 0,1.$$

Moduly sú tvorené striedajúcimi sa vrstvami ocele a scintilátoru, ktoré sú orientované kolmo na os zväzku, viď obrázok 3.1. Signál zo scintilačných dosťičiek je následne čítaný z každej strany optickými vláknami s posuvom vlnovej dĺžky (WLS¹), prechádza fotonásobičom (PMTs²) a následne postupuje do čítacej elektroniky [14].

Moduly pozostávajú z troch paralelných vrstiev buniek, rovnobežných s osou zväzku. Jednotlivé vrstvy sa označujú porade: A, BC a D, viď obrázok 3.2. Bunky vo vrstvách A a BC zaberajú oblasť s:

$$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,1 \times 0,1,$$

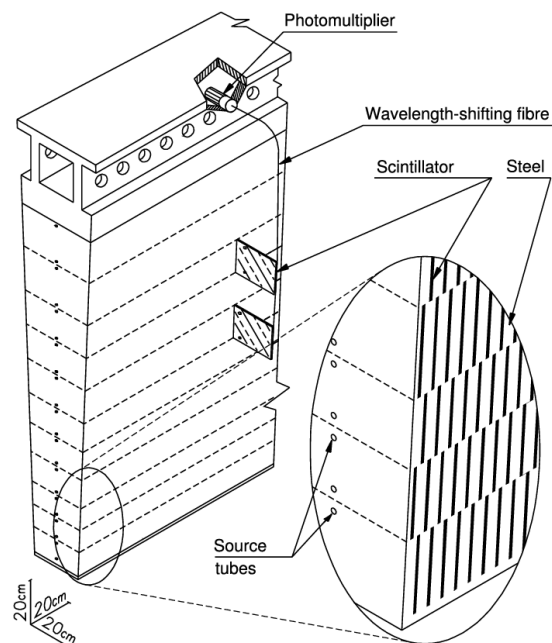
a bunky vo vrstve D zaberajú oblasť s:

$$\Delta\eta \times \Delta\phi = 0,2 \times 0,1.$$

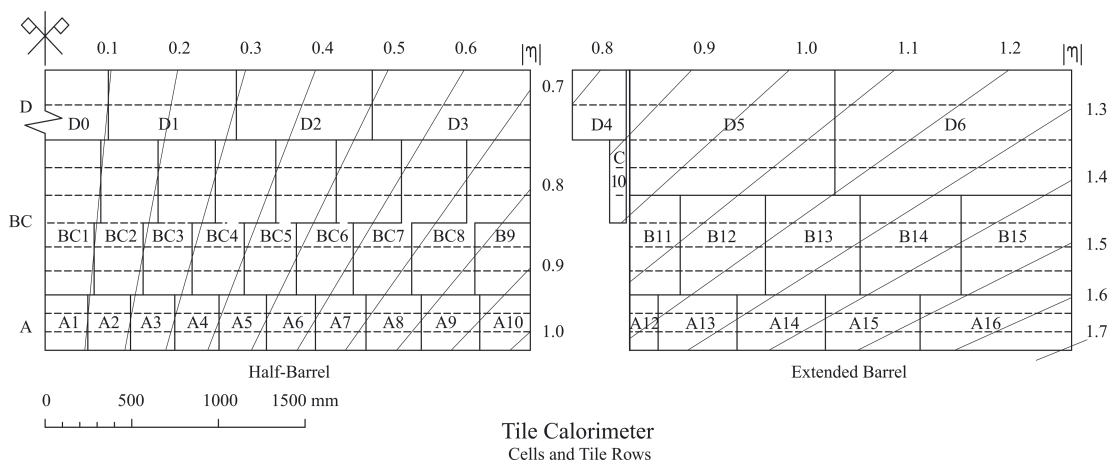
Scintilačné dosťičky vo vnútri každej bunky, ktorých môžu byť rádovo desiatky, sú čítané jedným fotonásobičom na každej strane, teda celá bunka je čítaná dvomi fotonásobičmi [16]. Preto je celková deponovaná energia častice v jednej bunke rovná súčtu energií vyčítaných z oboch signálov fotonásobičov.

¹Z anglického wave-length shifting.

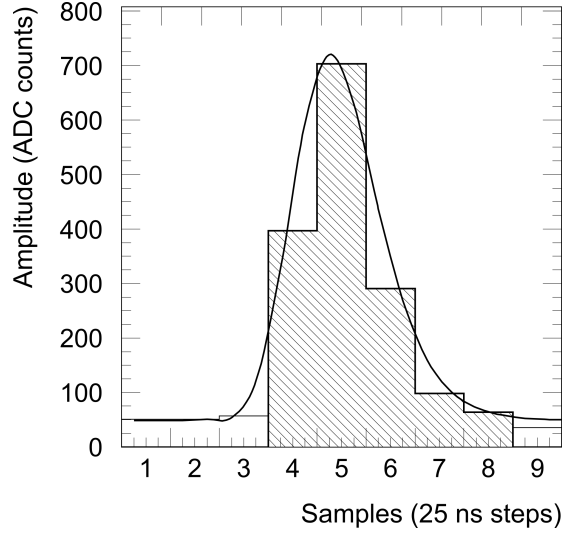
²Z anglického photomultiplier tubes.



Obr. 3.1: Schematická ilustrácia modulu kalorimetra Tilecal [15]. Scintilačné dosťičky sa striedajú s vrstvami ocele. Signál je čítaný z oboch strán scintilátorov a optickými vláknami vedený do fotonásobičov vo vonkajšej časti modulu.



Obr. 3.2: Usporiadanie buniek (plná čiara) modulu kalorimetra Tilecal a radov scintilačných dosťičiek (prerušovaná čiara). Zobrazená je polovica centrálného barelu (druhá polovica je symetrická) a jeden postranný barel [16].



Obr. 3.3: Fit výšok pulzu nameraných v 25 ns intervaloch [16].

Signál z fotonásobičov prechádza spracovaním tvaru na konštantnú šírku. Toto neskôr umožňuje určiť zozbieraný náboj zo scintilátorov (integrál z pulzu) na základe určenia amplitúdy pulzu. Výška pulzu je meraná v 25 ns intervaloch a na základe znalosti odozvy použitej elektroniky je signál fitovaný, viď obrázok 3.3 [16].

Vzťah medzi zozbieraným elektrickým nábojom a vyšetrouvanou deponovanou energiou je nutné určiť experimentálne. Napríklad pre elektróny je hodnota prevodového faktoru stanovená so štatistickou chybou na [16]:

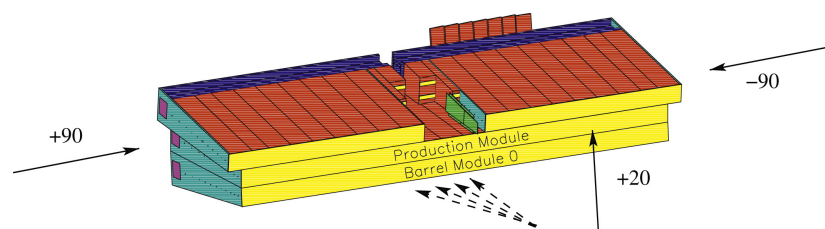
$$C_{\text{pC} \rightarrow \text{GeV}} = 1,050 \pm 0,003 \frac{\text{pC}}{\text{GeV}}. \quad (3.2)$$

4. Experimentálne usporiadanie a použité dáta

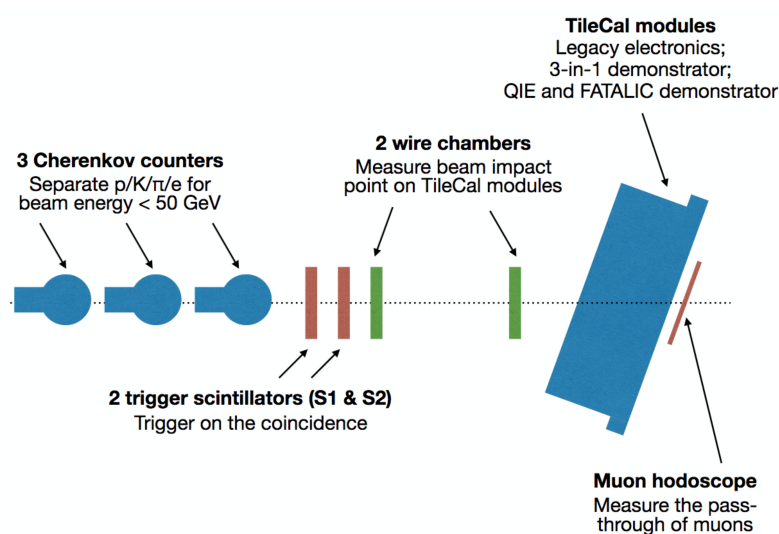
4.1 Experimentálne usporiadanie

Na skúmanie energetickej odozvy kalorimetra na nalietaťavajúce častice v bunke, do ktorej dopadal testovací zväzok, boli použité dáta namerané pri testovaní modulov kalorimetra Tilecal. Pri týchto testoch častice dopadali do konkrétnej bunky testovaného modulu pri nastavenej energii E_{beam} . Počas experimentu boli navyše použité ešte dva moduly, jeden na každej strane od modulu, kde dopadal testovací zväzok. V analyzovaných dátach to bol konkrétne modul C02 dlhého valca, do ktorého zväzok dopadal. Tento modul bol obklopený z dvoch strán modulom C01 dlhého valca a modulom E03 postranného valca podobne, ako je to na obrázku 4.1.

Testované moduly kalorimetra Tilecal boli umiestnené na pohyblivom stole, vďaka ktorému bolo možné nastaviť uhol θ a polohu dopadu z testovacieho zväzku do modulu.



Obr. 4.1: Usporiadanie modulov kalorimetra Tilecal. Testované sú tri moduly. Dva moduly dlhého valca a jeden modul postranného valca. Plné šípky označujú uhol vstupu zväzku a čiarkované šípky označujú projektívne uhly [16].



Obr. 4.2: Schéma experimentálneho usporiadania predradených detektorov [17]. Znázornené sú (zľava) tri Čerenkov detektory, dva scintilátory, dve zväzkové komory, modul kalorimetra Tilecal a miónový detektor.

Pred samotným dopadom testovacieho zväzku do bunky modulu prechádzal tento zväzok celou škálou predradených detektorov, viď obrázok 4.2. Konkrétne, zväzok najskôr prechádzal tromi Čerenkovymi počítačmi, následne dvomi scintilačnými detektormi a dvomi zväzkovými komorami až nakoniec dopadol do bunky modulu kalorimetra.

4.1.1 Čerenkove detektory

Častica s nenulovým elektrický nábojom, prechádzajúca prostredím s indexom lomu n rýchlosťou v prevyšujúcou rýchlosť svetla v tomto prostredí c/n , kde c je rýchlosť svetla vo vákuu, vyžaruje Čerenkovo žiarenie [10].

Čerenkove počítače môžu, pri správnej kalibrácii, v tomto usporiadaní slúžiť na separáciu nabitých častíc. Na tento účel sa používajú plynové detektory s dobre známou závislosťou indexu lomu na tlaku v plyne. Častice zväzku majú rovnakú hybnosť ale líšia sa hmotnosťou, napríklad elektróny sú výrazne ľahšie ako hadróny. Tento rozdiel v hmotnosti spôsobuje, že elektróny majú vyššiu rýchlosť ako hadróny a teda Čerenkovsky vyžarujú už pri nižších indexoch lomu.

Schopnosť rozlíšiť jednotlivé druhy častíc je limitovaná technickými možnosťami Čerenkovych detektorov.

4.1.2 Scintilačné detektory a zväzkové komory

Scintilačné detektory, zapojené v koincidencii, v tomto usporiadaní slúžia ako trigger na výber udalostí.

Za účelom kontroly rozbiehavosti zväzku sú v usporiadaní použité dve zväzkové, drôtené, komory. Každá z komôr meria polohu prechodu zväzku. Výsledkom sú dve súradnice v prvej a dve súradnice v druhej komore.

4.2 Použité dáta

Dáta pochádzajú z novembra 2018 a sú dvojakého druhu. V prvom prípade sa jednalo o tzv. *z-Scan*, kde sa menila poloha z dopadu zväzku v rámci jednej bunky pri konštantnej energii E_{beam} . V druhom prípade išlo o tzv. *Energy-Scan*, kde sa menila energia nalietačujúcich častíc E_{beam} pri konštantnej súradnici dopadu z . V oboch prípadoch dopadal testovací zväzok do bunky pod konštantným uhlom θ . Konkrétne označenia sady dát, bunky dopadu, uhlu dopadu θ , súradnice dopadu z a energii častíc E_{beam} sú uvedené v tabuľkách 4.1 a 4.2.

Číslo sady dát	Kód označenia bunky	Uhol dopadu θ [°]	Poloha dopadu z [mm]	Energia dopadu E_{beam} [GeV]
811920	A3	20	-59,9	20
811921	A3	20	-40,2	20
811922	A3	20	-19,1	20
811924	A3	20	0	20
811925	A3	20	20,1	20

Tabuľka 4.1: Podrobnosti o analyzovaných dátach - *z-Scan*

Číslo sady dát	Kód označenia bunky	Uhol dopadu θ [°]	Poloha dopadu z [mm]	Energia dopadu E_{beam} [GeV]
8812289	A2	20	-0,5	10
812290	A2	20	-0,5	10
812292	A2	20	-0,5	20
812293	A2	20	-0,5	20
812294	A2	20	-0,5	50
812295	A2	20	-0,5	50

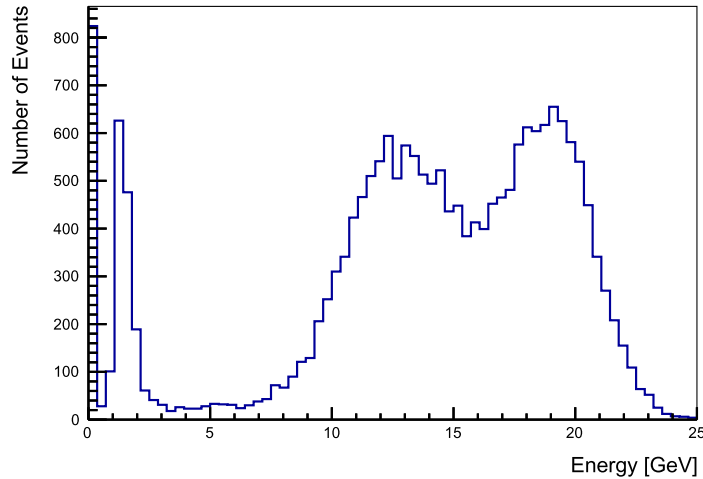
Tabuľka 4.2: Podrobnosti o analyzovaných dátach - *Energy-Scan*

5. Výber udalostí

Cieľom bakalárskej práce bolo analyzovať experimentálne namerané údaje z testov modulov kalorimetra Tilecal. Analýza dát spočívala predovšetkým vo výbere vhodných udalostí na ďalšie spracovanie, pomocou predradených detektorov, separácii elektrónov, skúmaní energetickej odozvy, energetického rozlíšenia a linearity modulov kalorimetra.

Uvedený postup bol s príslušnými modifikáciami zhodný pre všetky sady dát *z-Scanu* aj *Energy-Scanu*.

Prezentovaný postup je vykonaný pre sadu dát s číslom 811924. Odozva v bunke A3, do ktorej dopadal testovací zväzok a bunke za ňou, BC3, porovnaj s obrázkom 3.2, je pred výberom udalostí zobrazená v histograme na obrázku 5.1. Počet všetkých udalostí pred výberom bol 20002.



Obr. 5.1: Odozva v bunkách A3 a BC3 v module C02 pred výberom udalostí.

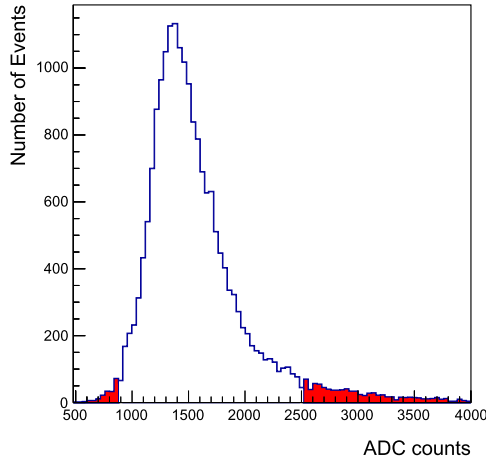
5.1 Výber udalostí predradenými detektormi

Testovací zväzok bol tvorený elektrónmi, hadrónmi a miónmi, pričom všetky častice mali rovnakú hybnosť. Zväzok bolo preto nutné orezať pomocou predradených detektorov popísaných v kapitole 4 a následne z neho vyseparovať elektróny.

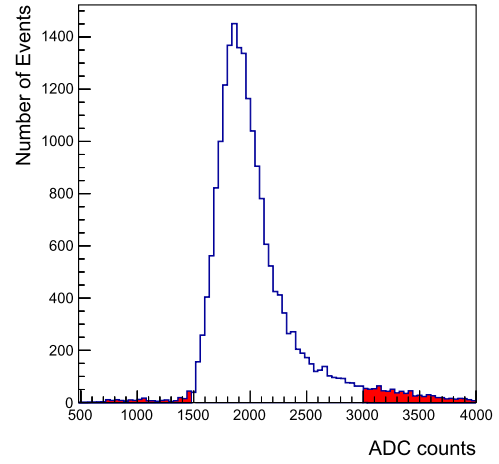
5.1.1 Použitie zväzkových scintilačných detektorov

Najskôr bol vykonaný rez pomocou dvoch scintilátorov zapojených v koincidenzii. Od signálov na oboch scintilátoroch požadujeme, aby mali rovnaký tvar, pretože slúžili ako trigger pre výber udalostí. Pre tento účel bol orezaný príliš vysoký a nízky signál, viď histograme na obrázkoch 5.2a a 5.2b.

Podľa [18] by jedným z vysvetlení príliš nízkeho signálu mohlo byť, že častica neprešla detektorom. Naopak, príliš vysoký signál by mohol znamenať prechod dvoch častíc scintilátorom v rovnakom skenovacom okne.



(a) Signál z prvého scintilátoru.



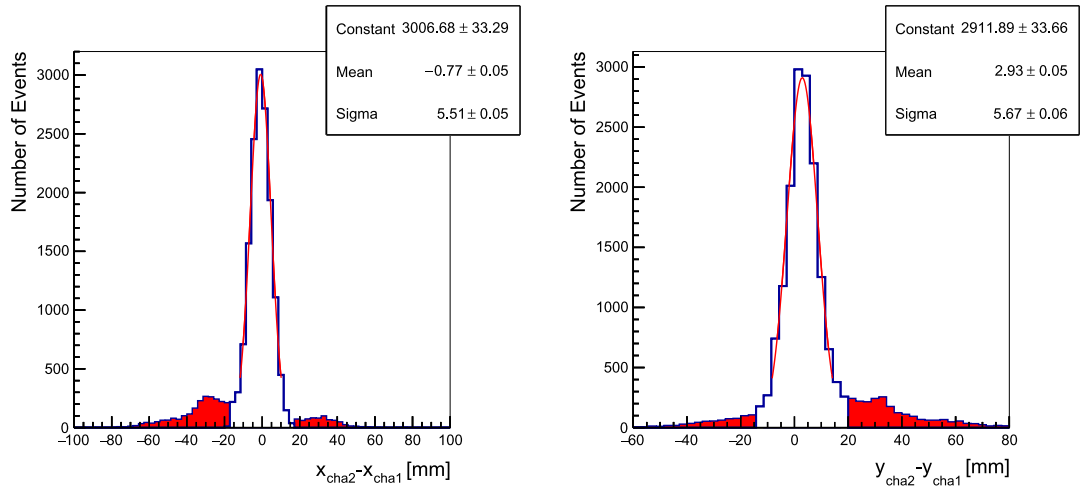
(b) Signál z druhého scintilátoru

Obr. 5.2: Signál zo zväzkových scintilátorov. Červenou farbou je zvýraznený orezaný signál a bielou farbou je znázornený signál, ktorý zostal po orezaní.

5.1.2 Použitie zväzkových komôr

V ďalšom kroku boli odstránené udalosti, pri ktorých sa častice priveľmi odkláňali od osi zväzku. Podľa [19] by to totiž mohlo znamenať, že nalietaťavajúca častica testovacieho zväzku bola ešte pred dopadom do modulu kalorimetra rozptýlená. Dôsledkom tejto zrážky by potom mohla byť strata hybnosti častice.

Tieto udalosti boli orezané na základe porovnania signálov zo zväzkových



(a) Rozbiehavosť testovacieho zväzku pozdĺž osi x .

(b) Rozbiehavosť testovacieho zväzku pozdĺž osi y .

Obr. 5.3: Rozbiehavosť testovacieho zväzku pozdĺž ôs x a y . Červenou čiarou je znázornený fit Gaussovou funkciou v intervale $\pm 2\sigma$ od strednej hodnoty a červenou plochou je zvýraznený orezaný signál. Bielou plochou je znázornený signál, ktorý zostal po orezaní v intervale $\pm 3\sigma$ od strednej hodnoty.

komôr. V týchto boli merané súradnice prechodu zväzku, pozdĺž ôs x a y : x_{cha1} , y_{cha1} pre prvú komoru, resp. x_{cha2} , y_{cha2} pre druhú komoru. Rozbiehavosť zväzku je charakterizovaná rozdielom v súradniciach zaznamenaných prvou a druhou komorou:

$$(x_{\text{cha2}} - x_{\text{cha1}}) \quad \text{a} \quad (y_{\text{cha2}} - y_{\text{cha1}}).$$

Na obrázkoch 5.3a a 5.3b sú znázornené histogramy rozbiehavosti testovacieho zväzku pozdĺž ôs x a y . Tieto histogramy boli iteratívne naťitované Gaussovou funkciou v intervale $\pm 2\sigma$ od strednej hodnoty a následne orezané v intervale $\pm 3\sigma$ od strednej hodnoty.

5.1.3 Použitie Čerenkovych počítáčov

Keďže všetky častice testovacieho zväzku mali rovnakú hybnosť, jednotlivé druhy častíc s rozdielnou hmotnosťou sa od seba odlišovali rýchlosťou. Požadované elektróny majú spomedzi všetkých troch druhov častíc najmenšiu hmotnosť a preto sa pohybujú najrýchlejšie. Na základe tejto úvahy mohol byť index lomu v Čerenkovych detektoroch nastavený tak, aby bolo možné zo zväzku jednoducho vyseparovať elektróny.

Toto nastavenie sa v skúmaných dátach nepotvrdilo, no spektrum Čerenkovych detektorov v niektorých prípadoch obsahovalo dobre rozlíšiteľný pík pri nižšom signále, ako bol signál dominantného píku. Udalosti prislúchajúce tomuto píku boli z ďalšej analýzy odstránené, pretože s vysokou pravdepodobnosťou neboli spôsobené elektrónmi. Tieto rezy sú znázornené v histogramoch na obrázkoch 5.4a až 5.4d.

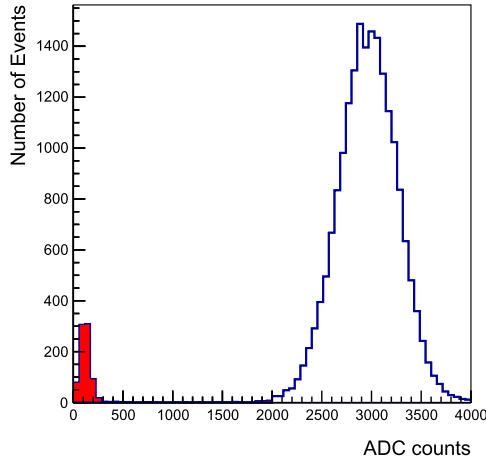
5.2 Výber elektrónov

Zmena v energetickej odozve, v bunkách A3 a BC3, po orezaní udalostí podľa vyššie popísaného postupu je vykreslená v histograme na obrázku 5.5. Zmena v odozve sa prejavila v prvom rade na počte udalostí, ktorý z pôvodných 20002 klesol na 10412, čo je približne polovica pôvodného počtu. V oboch prípadoch je v grafe vidieť tri výrazné píky na energiách približne 1,5 GeV, 13 GeV a 19 GeV. Výrazná zmena nastala v oblasti veľmi nízkych energií, kde po orezaní zmizol pík na nulovej energii, ktorý zodpovedal šumu.

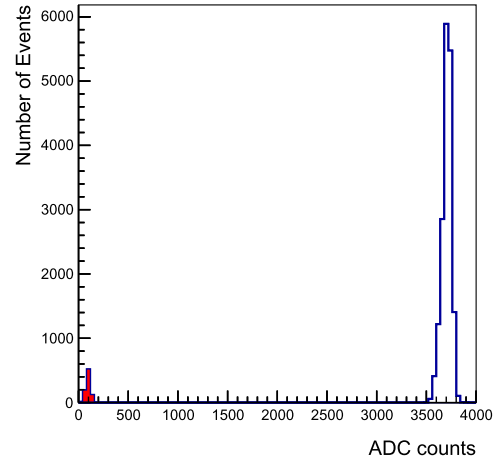
Z testovacieho zväzku, obsahujúceho elektróny, hadróny a mióny, bolo nutné pre účely ďalšieho spracovania vybrať udalosti, ktoré boli spôsobené práve elektrónmi. Separácia elektrónov z testovacieho zväzku bola vykonaná v dvoch krokoch. V prvom kroku boli odstránené udalosti spôsobené miónmi na základe veľkosti deponovanej energie. V druhom kroku bolo nutné rozhodnúť, ktoré zo zvyšných udalostí boli spôsobené elektrónmi a ktoré hadrónmi. Separácia bola vykonaná na základe rozdielov medzi elektromagnetickou a hadrónovou spríškou.

5.2.1 Orežanie miónov

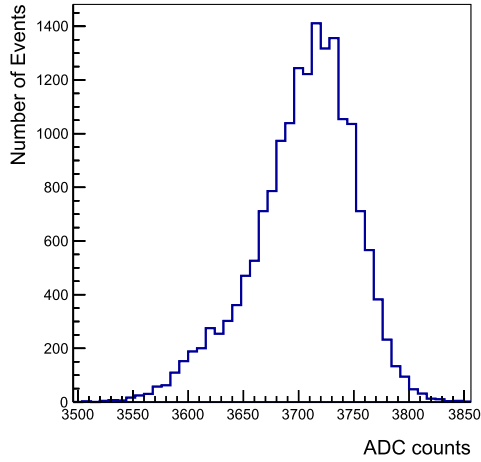
Mióny zanechávajú v kalorimetri výrazne menej energie ako elektróny alebo hadróny. Podľa článku [20] je pri energiách testovacieho zväzku $E_{\text{beam}} \geq 10$ GeV možné odstrániť udalosti spôsobené miónmi prostou podmienkou na celkovú deponovanú energiu v uvažovaných bunkách kalorimetra $E_{\text{dep}} \geq 5$ GeV. Vo všetkých



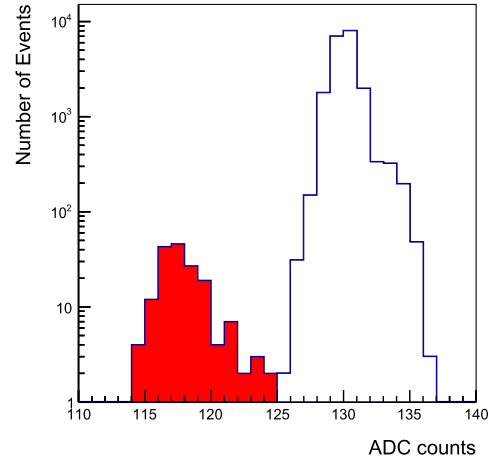
(a) Spektrum prvého Čerenkovho detektoru.



(b) Spektrum druhého Čerenkovho detektoru.



(c) Výrez zo spektra druhého Čerenkovho detektoru.



(d) Spektrum tretieho Čerenkovho detektoru.

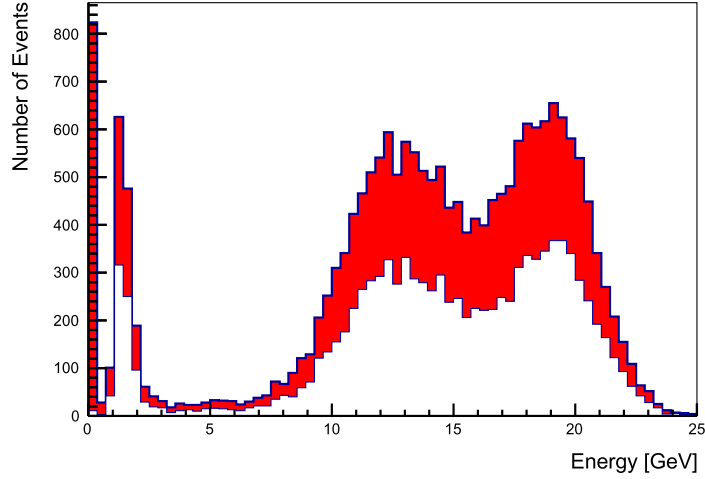
Obr. 5.4: Spektrum Čerenkovych detektorov. Červenou farbou je zvýraznený orezaný signál a bielou farbou je znázornený signál, ktorý zostal po orezaní.

prípadoch použitých v tejto analýze, bola podmienka na veľkosť energie zväzku splnená a tak bolo toto kritérium v plnej miere implementované.

Pri reze na odstránenie miónov boli uvažované bunky v moduloch C02, C01 a E03 v okolí dopadovej bunky A3 (vrátane) spolu s príslušnými regiónmi v druhej a tretej radiálnej vrstve¹.

Porovnanie odozvy v bunkách A3 a BC3 po orezaní udalostí spôsobených miónmi je v histograme na obrázku 5.8. Je vidieť, že po odstránení miónových udalostí z grafu zmizol pík prislúchajúci najnižšej energii 1,5 GeV. Počet udalostí klesol na 9699.

¹Dokopy teda bolo uvažovaných 24 buniek kalorimetra.



Obr. 5.5: Zmena v odozve v bunkách A3 a BC3 v module C02. Červenou farbou je znázornená odozva pred výberom udalostí a bielou farbou je znázornená odozva po orezaní podľa scintilátorov, zväzkových komôr a Čerenkovych detektorov.

5.2.2 Orežanie hadrónov

V ďalšom kroku bolo pri výbere elektrónov nutné odstrániť udalosti spôsobené hadrónmi. Táto separácia bola vykonaná na základe rozdielu medzi profilmi elektromagnetickej a hadrónovej spršky. Elektromagnetická sprška je užšia a má menšiu penetračnú hĺbku ako hadrónová sprška. Elektromagnetická sprška preto zanechá v dopadovej bunke modulu kalorimetra väčšiu časť svojej energie, ako sprška hadrónová².

Pre tento účel sa definuje pozdĺžny C_{long} a celkový C_{tot} profil spršky nasledovne:

$$C_{\text{long}} = \sum_i \frac{E_i}{E_{\text{beam}}}, \quad (5.1)$$

$$C_{\text{tot}} = \frac{1}{\sum_i E_i^\alpha} \sqrt{\sum_i \frac{\left(E_i^\alpha - \sum_i \frac{E_i^\alpha}{N_{\text{cell}}}\right)^2}{N_{\text{cell}}}}, \quad (5.2)$$

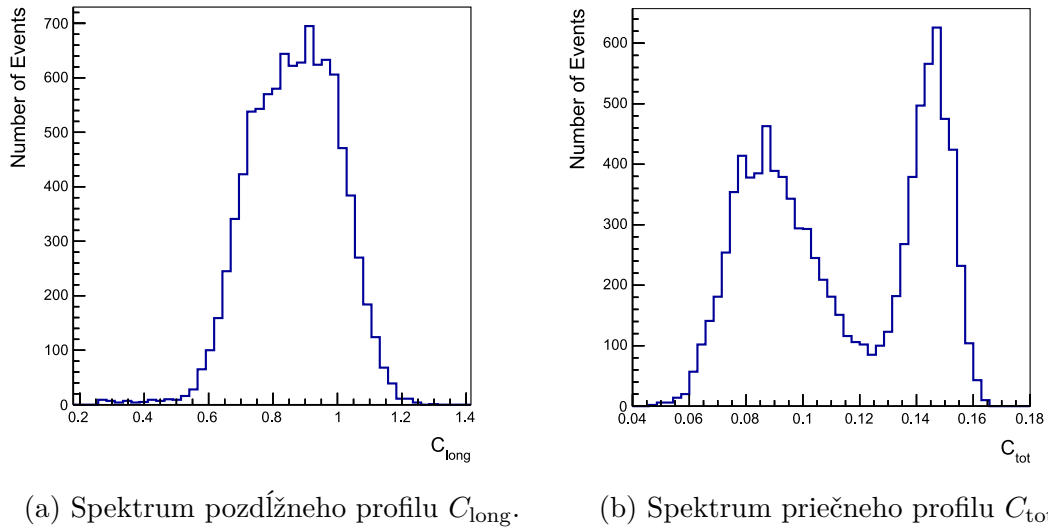
kde sa sčíta cez rovnaké bunky, aké boli uvažované pri orežovaní miónov, E_{beam} je energia zväzku, N_{cell} je počet uvažovaných buniek a $\alpha = 0,6$ je parameter získaný z Monte Carlo simulácií na dosiahnutie najlepšej elektrón-hadrónovej separácie. Spektrá pozdĺžneho a priečneho profilu spršky sú vykreslené v histogramoch na obrázkoch 5.6a a 5.6b.

Význam parametrov C_{long} a C_{tot} spočíva v tom, že pri ich vzájomnom skombinovaní, viď graf na obrázku 5.7, je vidieť dve maximá. Podľa [20] maximum v ľavej spodnej časti zodpovedá udalostiam spôsobeným hadrónmi a maximum v pravej hornej časti elektrónmi.

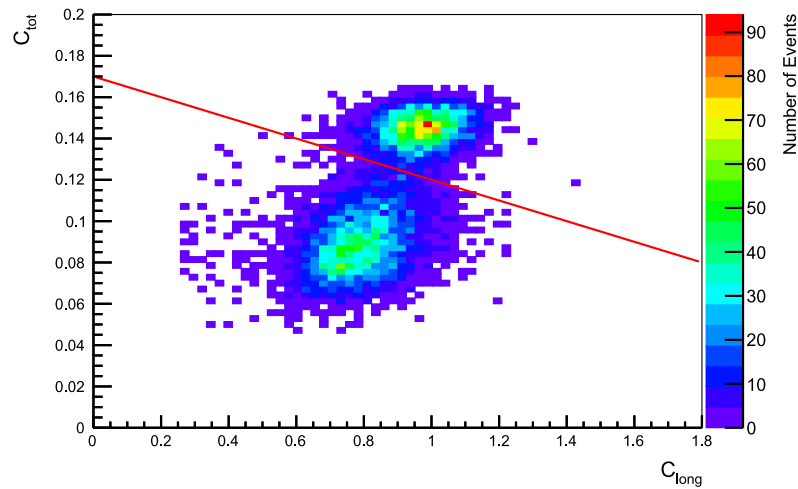
²V článku [20] je uvedený príklad 100 GeV častíc dopadajúcich do kalorimetra pod uhlom $\theta = 20^\circ$ pri ktorých je podiel energie zanechanej v prvej radiálnej vrstve elektromagnetickou sprškou 89 % a v prípade hadrónovej spršky 25 %.

Pri tvorbe hadrónovej spršky sa časť energie nalievajúcej častice spotrebuje na rozbitie jadier a navyše časť energie unikne prostredníctvom neutrín a miónov tvorených z rozpadov hadrónov. Túto časť energie nie je možné zachytiť v kalorimetri a tak je odozva na hadróny vo všeobecnosti menšia ako na elektróny. Keďže parameter C_{long} má význam celkovej relatívnej deponovanej energie častice v kalorimetri, pík pri vyšších hodnotách pozdĺžneho profilu prislúcha elektrónom. Na strane druhej parameter C_{tot} má význam obdobný ako RMS. Keďže je hadrónová sprška širšia ako elektromagnetická, budú jej prislúchať nižšie hodnoty celkového profilu.

V grafe na obrázku 5.7 je znázornený výber elektrónov podľa profilov spršky.

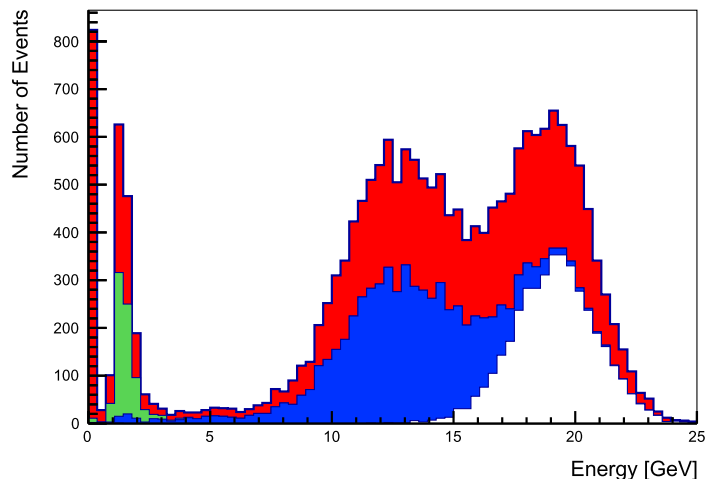


Obr. 5.6: Spektrum priečného a pozdĺžneho profilu.

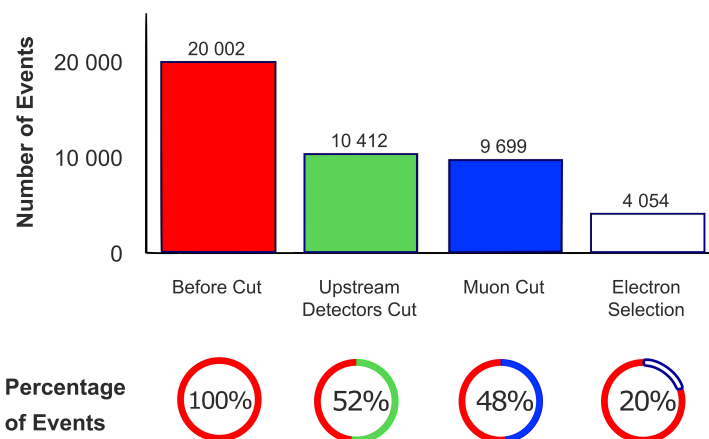


Obr. 5.7: Kombinácia parametrov C_{long} a C_{tot} použitá na separáciu elektrónov a hadrónov. Červenou čiarou je vyznačený použitý rez. Udalosti v polovine nad rezom prislúchajú elektrónom.

V histograme na obrázku 5.8 je vykreslená zmena v odozve v bunkách A3 a BC3 po orezaní udalostí spôsobených hadrónmi podľa vyššie popísaného postupu. Po odstránení hadrónov, ktoré prislúchali píku na energii 13 GeV, zostal vyseparovaný jeden pík na energii 19 GeV. Celkový počet udalostí po orezaní klesol na 4054, teda asi na 20 % pôvodného počtu. Celkový počet udalostí odstránených pri jednotlivých rezoch, ako aj ich približný percentuálny podiel, je zhrnutý v infografike na obrázku 5.9.



Obr. 5.8: Zmena v odozve v bunkách A3 a BC3 v module C02. Červenou farbou je znázornená odozva pred výberom udalostí. Zelenou farbou je znázornená odozva po výbere udalostí podľa predradených detektorov. Modrou farbou je znázornená odozva po orezaní podľa predradených detektorov spolu s odstránenými mióňmi. Bielu farbou je znázornený výsledný orezaný signál od elektrónov.



Obr. 5.9: Počty a percentuálne podiely udalostí po jednotlivých rezoch na pôvodnom súbore dát.

6. Odozva a energetické rozlíšenie kalorimetra

6.1 Odozva kalorimetra na elektróny

V kapitole 5 bol popísaný postup, ktorým sa z testovacieho zväzku separovali elektróny. V histograme na obrázku 5.8 je bielou farbou vykreslená odozva bunky A3 kalorimetra na elektróny. Je vidieť, že tento signál má tvar normálneho rozdelenia. Toto rozdelenie energie deponovanej elektrónmi je následne iteratívne nafiťované Gaussovou funkciou v oblasti $\pm 2\sigma$ od strednej hodnoty.

Pre ďalšie spracovanie bolo nutné uvažovať signál čítaný všetkými uvažovanými¹ bunkami.

V histograme na obrázku 6.1b je vykreslená odozva kalorimetra Tilecal na elektróny vo všetkých uvažovaných bunkách. Histogram je opäť iteratívne nafiťovaný Gaussovou funkciou v oblasti $\pm 2\sigma$ od strednej hodnoty.

Ak boli uvažované všetky bunky kalorimetra v okolí bunky, do ktorej dopadal testovací zväzok (obr. 6.1b) je vidieť oproti vyššie prezentovanému prípadu (obr. 6.1a) nárast strednej hodnoty energie asi o 7%. Tento nárast zodpovedá tomu, že nie celá elektromagnetická sprška bola zachytená v bunke dopadu. Naopak to, že zmena nie je drastická zodpovedá tomu, že elektromagnetická sprška má pomerne malé rozmery. Rozdiel medzi strednou hodnotou energie v bunke, do ktorej zväzok dopadal a medzi všetkými uvažovanými bunkami narastá s rastúcou energiou zväzku.

Rovnakým postupom boli spracované aj ostatné dátové súbory.

6.2 Oscilácia signálu

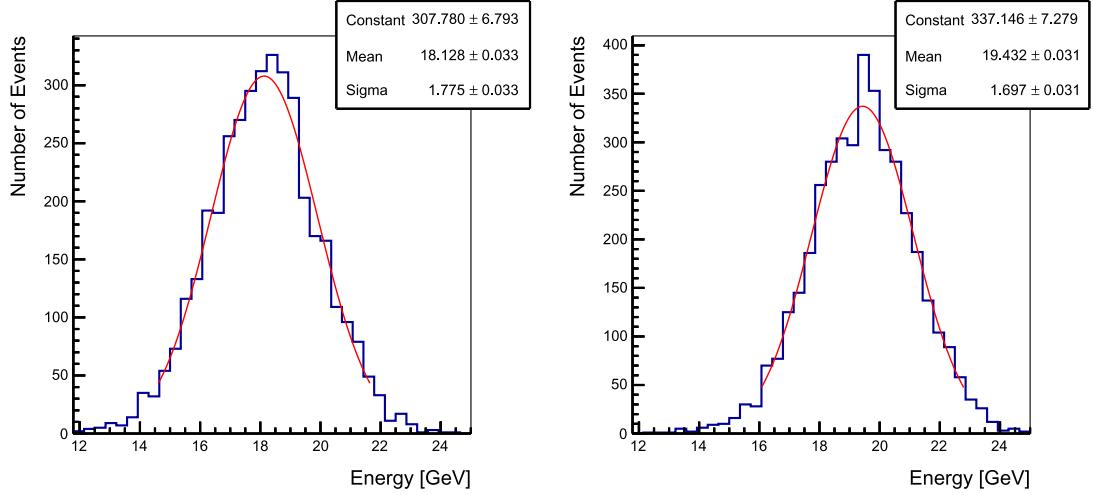
Ako bolo popísané v podkapitole 3.2, moduly kalorimetra sú tvorené striedajúcimi sa vrstvami ocele a scintilátoru. Energia, ktorú častica stratí pri prechode aktívnym prostredím scintilačných doštičiek je detegovaná a ďalej spracovaná. Naopak energiu, ktorú častica stratí v pasívnom prostredí ocelového absorbátora nie je možné zachytiť.

Kvôli periodickému rozostupu medzi scintilačnými doštičkami, je možné vidieť moduláciu deponovanej energie v bunke, do ktorej dopadal testovací zväzok, v závislosti na polohe dopadu x_{imp} . Na tento účel boli v predchádzajúcej kapitole 5 z testovacieho zväzku vyberané elektróny. Keďže elektróny interagujú v hmote kalorimetra, pomerne malou, elektromagnetickou sprškou, je táto modulácia dobre viditeľná. Táto závislosť je zobrazená v grafe na obrázku 6.2.

V mieste, kde nalietaťavajúca častica dopadla na scintilátor je možné vidieť lokálne maximum a naopak v prípade absorbátora lokálne minimum. Je zrejmé, že vyhodnotené dáta kopírujú² periodickú štruktúru bunky, do ktorej dopadal

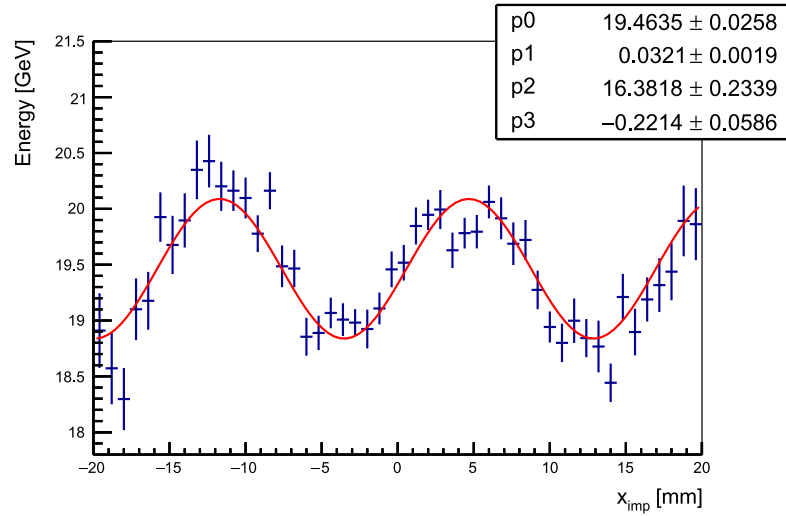
¹Uvažované bunky kalorimetra sú totožné ako pri určovaní parametrov C_{long} a C_{tot} .

²v priemete pod príslušným uhlom nalietaťavajúceho zväzku



(a) Odozva kalorimetra Tilecal v bunke dopadu na elektróny. (b) Odozva kalorimetra Tilecal vo všetkých uvažovaných bunkách na elektróny.

Obr. 6.1: Odozva kalorimetra Tilecal v bunke dopadu, resp. vo všetkých uvažovaných bunkách na elektróny. Červenou čiarou je znázornený fit Gaussovou funkciou v intervale $\pm 2\sigma$ od strednej hodnoty.



Obr. 6.2: Závislosť deponovanej energie vo všetkých uvažovaných bunkách, na polohe dopadu x_{imp} . Červenou farbou je znázornený fit funkciou (6.1).

testovací zväzok. Dáta boli preto nafitované periodickou funkciou [20, 19]:

$$E(x_{\text{imp}}) = p_0 \left[1 + p_1 \sin \left(\frac{2\pi x_{\text{imp}}}{p_2} + p_3 \right) \right], \quad (6.1)$$

kde E je deponovaná energia, x_{imp} je poloha dopadu testovacieho zväzku do bunky, a p_0, \dots, p_3 sú parametre fitu. Jednotlivé parametre majú nasledovný význam:

- p_0 má význam strednej hodnoty energie $\langle E \rangle$ oscilácie,

- p_1 má význam relatívnej amplitúdy oscilácie,
- p_2 má význam periódy λ oscilácie,
- p_3 má význam fáze oscilácie.

Analogicky boli zistené parametre fitov pre všetky dátové súbory *z-Scanu* aj *Energy-Scanu*.

Nie je bez zaujímavosti, že pri niektorých ďalších dátových súboroch³, v ktorých bola poloha dopadu z príliš blízko okraju testovanej bunky, modulácia energie nevykazovala periodický charakter. Ukážka takto vyzerajúceho signálu je uvedená v prílohe A.1.

6.3 Uniformita odozvy

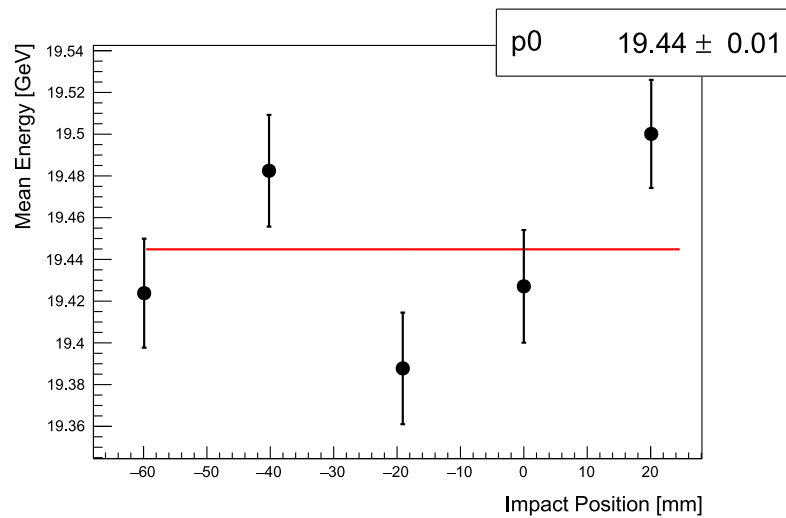
V dátových súboroch *Z-Scan* bolo možné sledovať závislosť strednej hodnoty energie $\langle E(z) \rangle$ na polohe dopadu zväzku do bunky modulu kalorimetra, určenej ako parameter p_0 zo vzťahu (6.1). Táto závislosť je znázornená v grafe na obrázku 6.3.

Závislosť je preložená konštantou. Stredná deponovaná energia elektrónov s počiatočnou energiou 20 GeV je týmto fitom stanovená na:

$$\langle E \rangle = (19,44 \pm 0,01) \text{ GeV}.$$

Štatistická chyba fitu sa pohybuje na úrovni 0,05 %. V prípade ideálnej kalibrácie kalorimetra by sa táto hodnota zhodovala s hodnotou energie testovacieho zväzku $E_{\text{beam}} = 20 \text{ GeV}$. Kalibrácia modulov kalorimetra sa teda od ideálnej kalibrácie líši o menej ako 3 %.

³Tieto dátové súbory nie sú zobrazené v tabuľkách 4.1 a 4.2.



Obr. 6.3: Závislosť strednej hodnoty celkovej deponovanej energie na polohe dopadu zväzku do bunky modulu kalorimetra $\langle E(z) \rangle$. Červenou farbou je znázornený fit konštantou.

Ako bolo spomenuté v podkapitole 6.2, závislosť modulácie deponovanej energie na polohe dopadu testovacieho zväzku do bunky kalorimetra $E(x_{\text{imp}})$ je daná periodickou štruktúrou bunky. Rozdiely v tejto modulácii, ktoré sú vidieť pri zmene polohy dopadu x_{imp} sú spôsobené neuniformitou inštrumentácie. Táto môže byť spôsobená napríklad rozdielnym svetelným výťažkom v jednotlivých scintilátoroch, rozdielmi v kontaktoch medzi vláknami a scintilačnými doštičkami alebo rôznym útlmom vo vláknach samotných.

Uniformita testovacieho zväzku je daná ako podiel smerodajnej odchýlky σ z vyššie spomínaných hodnôt strednej energie a priemernej hodnoty týchto energií:

$$\frac{\sigma}{\langle E(z) \rangle}.$$

V testovanom prípade pri použití všetkých uvažovaných buniek kalorimetra bola hodnota uniformity signálu v bunke, do ktorej testovací zväzok dopadal stanovená na približne 0,21 %.

6.4 Perióda štruktúry

Z dátových súborov *z-Scanu* bolo možné určiť priemernú hodnotu periódy λ oscilácií. Z tejto hodnoty bolo následne možné priemetom do roviny modulu stanoviť periódu štruktúry samotnej bunky kalorimetra. V grafe na obrázku 6.4 je vynesená závislosť periódy oscilácie od polohy dopadu testovacieho zväzku do bunky $\lambda(z)$.

Táto závislosť je naitovaná konštantou. Priemerná perióda oscilácií je pomocou fitu stanovená na:

$$\lambda = (16,72 \pm 0,12) \text{ mm}.$$

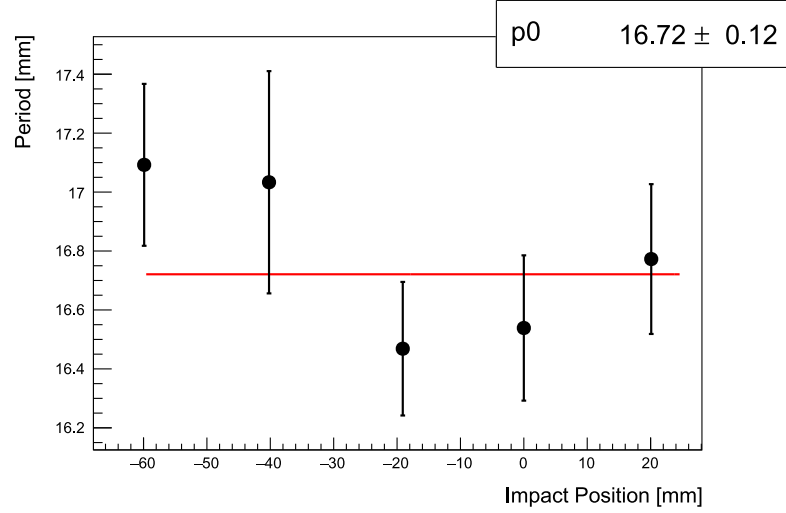
Ak by testovací zväzok dopadal na bunku kalorimetra pod uhlom $\theta = 0^\circ$, výsledok by mal vykazovať zhodu so vzdialenosťou rozostupu scintilačných doštičiek, čo je 18,3 mm. Keďže dopadajúci zväzok elektrónov zvieral s modulom kalorimetra uhol $\theta = 20^\circ$, bolo nutné tento výsledok porovnať s priemetom periódy štruktúry do roviny zvierajúcej s modulom kalorimetra rovnaký uhol, ako testovací zväzok. Tento priemet $\tilde{\lambda}$ bol potom určený podľa vzťahu:

$$\tilde{\lambda} = \lambda \cos(\theta) \quad (6.2)$$

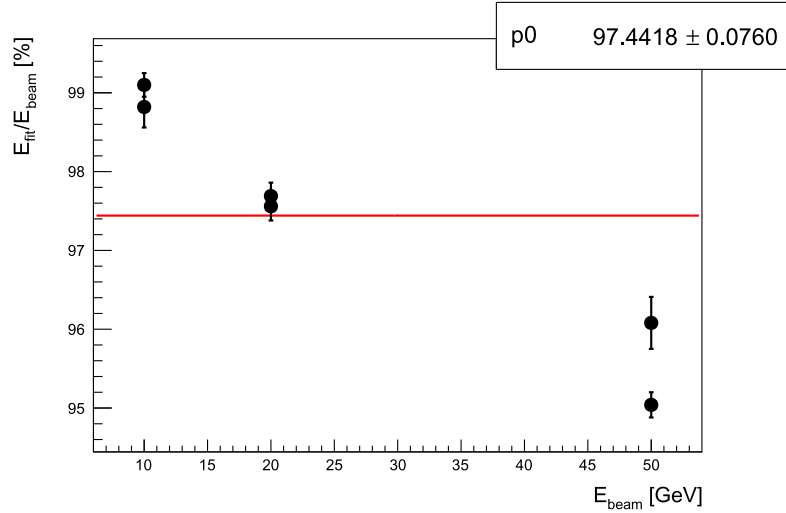
na 17,20 mm. Táto hodnota sa od nameranej hodnoty líši o menej ako 3 %.

6.5 Linearita energetickej odozvy kalorimetra

Pre správne fungovanie kalorimetra je nutné poznať závislosť relatívnej deponovanej energie častíc na energii zväzku. Táto závislosť by mala byť približne konštantná. V grafe na obrázku 6.5 je vykreslená závislosť relatívnej energie zväzku $E_{\text{fit}}/E_{\text{beam}}$, kde E_{fit} je stredná energia stanovená sínusovým fitom podľa podkapitoly 6.2. Táto závislosť je preložená konštantou. Hodnota konštanty daná fitom je stanovená na $(97,44 \pm 0,08) \%$.



Obr. 6.4: Závislosť periódy oscilácie na polohe dopadu zväzku do bunky modulu kalorimetra λ . Červenou farbou je znázornený fit konštantou.



Obr. 6.5: Závislosť celkovej relatívnej energie deponovanej v kalorimetri na energii zväzku. Červenou farbou je znázornený fit konštantou.

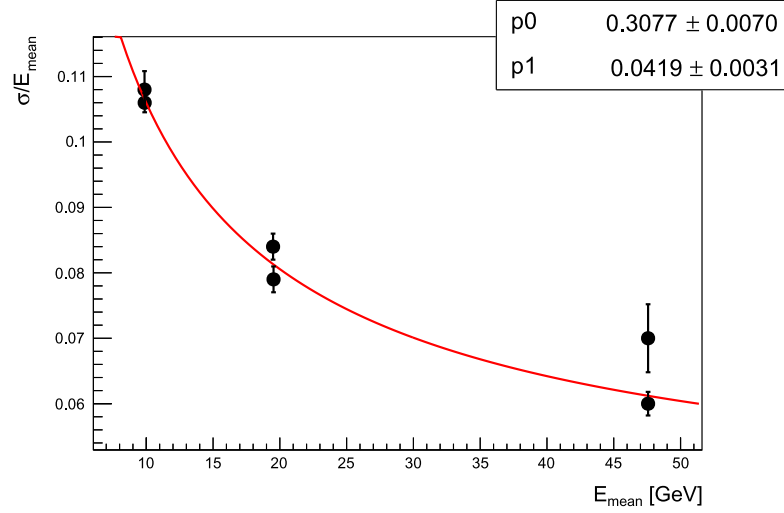
6.6 Rozlíšenie detektora

Rozlíšenie kalorimetra je definované ako

$$\frac{\sigma}{E_{\text{mean}}},$$

kde E_{mean} je stredná hodnota energetickej odozvy kalorimetra a σ je jej smerodajná odchýlka. Fluktuácie, pri tvorbe spíšok, zbere a spracovaní signálu, toto rozlíšenie rôzne ovplyvňujú. V sendvičových kalorimetroch hrajú významnú rolu fluktuácie počtu častíc v scintiátoroch, ktoré sú dané Poissonovým rozdelením [16].

Rozlíšenie kalorimetra je kvôli Poissonovmu rozdeleniu úmerné prevrátenej



Obr. 6.6: Závislosť rozlíšenia kalorimetra na strednej hodnote energie. Červenou čiarou je znázornený fit funkciou 6.4.

hodnote odmocniny zo strednej energie:

$$\frac{\sigma}{E_{\text{mean}}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \quad (6.3)$$

Vplyvy rôznych efektov, ako zmienených fluktuácií, šumu, neuniformity,..., sú väčšinou nekorelované a so zjednodušením je možné zapísať závislosť energetického rozlíšenia kalorimetra na energii v tvare [21]:

$$\frac{\sigma}{E_{\text{mean}}} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \quad (6.4)$$

kde \oplus značí súčet druhých mocnín.

Z histogramov odozvy kalorimetra na elektróny, získaných podľa postupu z podkapitoly 6.1, pre dátové súbory *Energy-Scan*, boli fitom Gaussovou funkciou získané hodnoty strednej energie E_{mean} a smerodajnej odchýlky σ potrebné pre určenie rozlíšenia. V grafe na obrázku 6.6 je vykreslená závislosť rozlíšenia kalorimetra na strednej hodnote energie. Táto závislosť je fitovaná vzťahom (6.4).

Z uvedeného fitu bola potom stanovená konštanta štatistického člena rozlíšenia kalorimetra na prevrátenej hodnote odmocniny z energie a :

$$a = (30,77 \pm 0,70) \% \sqrt{\text{GeV}},$$

V uvedenom článku je táto hodnota stanovená na:

$$\tilde{a} = (28,8 \pm 0,8) \% \sqrt{\text{GeV}}.$$

Tieto hodnoty sa líšia o menej ako 7%.

6.7 Vylepšenie rozlíšenia kalorimetra

V podkapitole 6.2 boli stanovené parametre modulácie energetického signálu v závislosti na polohe dopadu testovacieho zväzku do bunky kalorimetra $E_{\text{fit}}(x_{\text{imp}})$,

viď funkcia (6.1). Znalosť tejto funkcie bolo možné využiť na snahu o zlepšenie energetického rozlíšenia kalorimetra.

Nech E_{corr} je korekcia na energetický signál, ktorá v sebe zahŕňa vyššie spomínanú moduláciu vzťahom:

$$E_{\text{corr}} = \frac{E}{p_0 \left[1 + p_1 \sin \left(\frac{2\pi x_{\text{imp}}}{p_2} + p_3 \right) \right]} = \frac{E}{E_{\text{fit}}}, \quad (6.5)$$

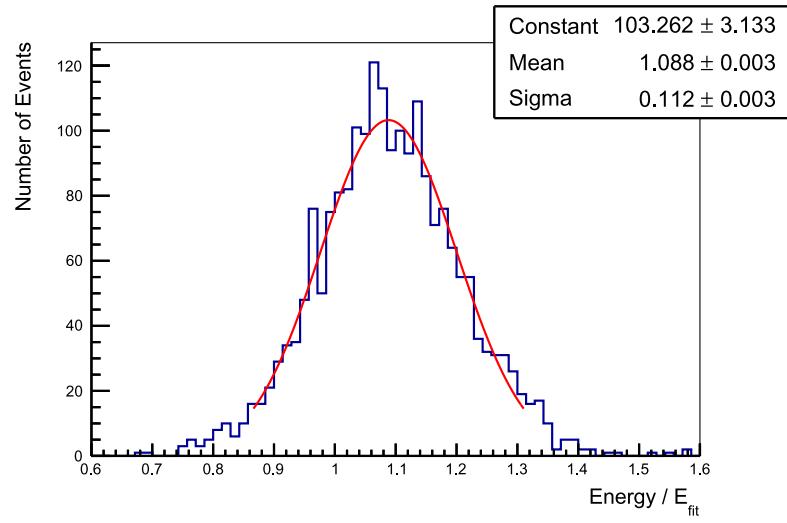
kde E je energia deponovaná v kalorimetri, stanovená ako stredná hodnota fitu Gaussovou funkciou podľa postupu z podkapitoly 6.1. Rozdelenie tohto parametru bolo následne fitované Gaussovou funkciou, podobne ako v grafe na obrázku 6.7.

Korigované hodnoty rozlíšenia boli následne vypočítané ako σ/μ , kde μ je stredná hodnota Gaussiánu a σ je jej smerodajná odchýlka. Tieto boli vynesené do grafov a nafitované funkciou (6.4), analogicky k 6.6. Uvedený graf je vykreslený na obrázku 6.8.

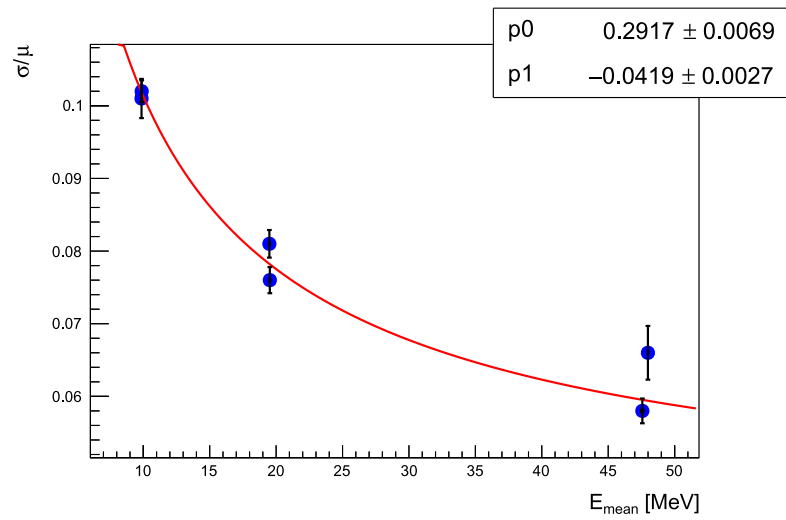
Z uvedeného fitu bola potom stanovená konštanta štatistického členu rozlíšenia kalorimetra na prevrátenej hodnote odmocniny z energie a :

$$a = (29,17 \pm 0,70) \% \sqrt{\text{GeV}}.$$

Je vidieť, že po korekcii sa rozlíšenie zlepšilo a od referenčnej hodnoty sa líši o menej ako 1,5 %.



Obr. 6.7: Rozdelenie korekcie na energetický signál E_{corr} . Červenou farbou je znázornený fit Gaussovou funkciou.



Obr. 6.8: Závislosť korekcie rozlíšenia kalorimetra na strednej hodnote energie. Červenou čiarou je znázornený fit funkciou (6.4).

Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo zoznámiť sa so základmi spracovania experimentálnych dát nameraných pri testoch modulov kalorimetra Tilecal a vyhodnotiť energetickú odozvu, uniformitu, linearitu a energetické rozlíšenie kalorimetra na elektróny. V nadväznosti na tieto časti práce bola vykonaná aj korekcia signálu s cieľom zlepšiť rozlíšenie kalorimetra.

Boli analyzované dve sady dát. V jednom prípade sa menila poloha dopadu zväzku v rámci jednej bunky pri konštantnej energii E_{beam} . V druhom prípade sa menila energia nalietaujúcich častíc E_{beam} pri konštantnej súradnici dopadu z .

Z udalostí spôsobených testovacím zväzkom bolo najskôr nutné vyselektovať vhodné udalosti spôsobené elektrónmi. Táto časť bola vykonaná pomocou detektorov, predradených testovaným modulom kalorimetra. Podrobný popis tejto selekcie je uvedený v piatej kapitole. Rovnako je tam popísaný postup, ktorým boli separované elektróny od hadrónov a miónov.

V práci bolo ukázané, ako sa mení energetická odozva skúmaných modulov v závislosti na polohe dopadu zväzku do bunky a v závislosti na energii dopadu. Je vidieť očakávaný rozdiel, asi 7 %, medzi energiou deponovanou v jednej bunke a medzi energiou deponovanou v celom skúmanom regióne buniek.

Deponovaná energia v bunkách kalorimetra vykazuje podľa očakávania sínusovú moduláciu v závislosti na polohe dopadu. Táto závislosť odzrkadľuje vnútornú štruktúru bunky. Z parametrov fitu tejto modulácie potom bolo možné určiť uniformitu odozvy, periódu štruktúry testovanej bunky a linearitu energetickej odozvy.

Odozva testovacích modulov sa ukázala byť dobre uniformná, pričom uniformita bola stanovená na asi 0,21 %. Odchýlka od ideálnej kalibrácie pritom nebola väčšia ako 3 %.

Periódna oscilácia sa dobre zhodovala s očakávanou hodnotou a po priemetu skutočnej hodnoty do príslušného uhla vidíme, že sa tieto hodnoty líšia o menej ako 3 %.

Linearita testovacích modulov sa na obrázku ukázala byť dostatočná pretože rozdiel medzi stanovenými hodnotami relatívnej deponovanej energie a hodnotou stanovenou fitom konštantou nebol väčší ako 3 %.

Konštanta štatistického členu rozlíšenia, stanovené fitom sa líši od referenčnej hodnoty o menej ako 7 %. Hodnota po korekcii signálu sa však už od tejto hodnoty líši o menej ako 1,5 %.

Seznam použité literatury

- [1] CERN. Member states, 2018. Dostupné z <https://home.cern/about/member-states>.
- [2] Esma Mobs. The CERN accelerator complex - August 2018. Complexe des accélérateurs du CERN - Août 2018. Aug 2018. General Photo, Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/2636343>.
- [3] LHC Guide. Dostupné z <http://cds.cern.ch/record/2255762>, Mar 2017.
- [4] CERN. The Large Hadron Collider, 2018. Dostupné z <https://home.cern/topics/large-hadron-collider>.
- [5] CERN. About LHC at home, 2018. Dostupné z <http://lhathome.web.cern.ch/about>.
- [6] CERN. About the ATLAS Experiment, 2019. Dostupné z <https://atlas.cern/discover/detector>.
- [7] Joao Pequeno. Computer generated image of the whole ATLAS detector. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/1095924>, Mar 2008.
- [8] Joao Pequeno and Paul Schaffner. An computer generated image representing how ATLAS detects particles. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/1505342>, Jan 2013.
- [9] CERN. The Inner Detector, 2019. Dostupné z <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>.
- [10] Claus Grupen and Boris Shwartz. *Particle Detectors*. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge University Press, 2 edition, 2008.
- [11] CERN. Calorimeter, 2019. Dostupné z <https://atlas.cern/discover/detector/calorimeter>.
- [12] Joao Pequeno. Computer Generated image of the ATLAS calorimeter. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/1095927>, Mar 2008.
- [13] CERN. Trigger and Data Acquisition System, 2019. Dostupné z <https://atlas.cern/discover/detector/trigger-daq>.
- [14] Ana Maria Henriques Correia. The ATLAS Tile Calorimeter. Technical Report ATL-TILECAL-PROC-2015-002, CERN, Geneva, Mar 2015. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/2004868>.
- [15] G Aad et al. Readiness of the atlas tile calorimeter for lhc collisions. *European Physical Journal C*, 01 2010.
- [16] Tomáš Davídek. *Instrumentace a kalibrace hadronového kalorimetru ATLAS Tilecal*. Habilitační práce, Univerzita Karlova v Praze, 2013.

- [17] Douglas Schaefer. Test Beam Studies for the ATLAS Tile Calorimeter Upgrade Readout Electronics. Jan 2018. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/2301459>.
- [18] A Christov. Response of Production Modules of the ATLAS Tile Calorimeter to Electrons. Technical Report ATL-TILECAL-PUB-2005-009. ATL-COM-TILECAL-2005-015. CERN-ATL-COM-TILECAL-2005-015, CERN, Geneva, Dec 2005.
- [19] ATLAS Collaboration. Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Tile Calorimeter. Technical Report CERN-LHCC-2017-019. ATLAS-TDR-028, CERN, Geneva, Sep 2017. Dostupné z <https://cds.cern.ch/record/2285583>.
- [20] P Adragna et al. Testbeam Studies of Production Modules of the ATLAS Tile Calorimeter. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A*, 606(ATL-TILECAL-PUB-2009-002. ATL-COM-TILECAL-2009-004. 3):362–394. 73 p, Feb 2009. Dostupné z <http://cds.cern.ch/record/1161354>.
- [21] Yu A Kulchitskii, P V Tsiareshka, and V B Vinogradov. Electron Energy Resolution of the ATLAS TILECAL Modules with Fit Filter Method (July 2002 test beam). Technical Report ATL-TILECAL-PUB-2006-004. ATL-COM-TILECAL-2006-003, CERN, Geneva, Feb 2006.

Zoznam obrázkov

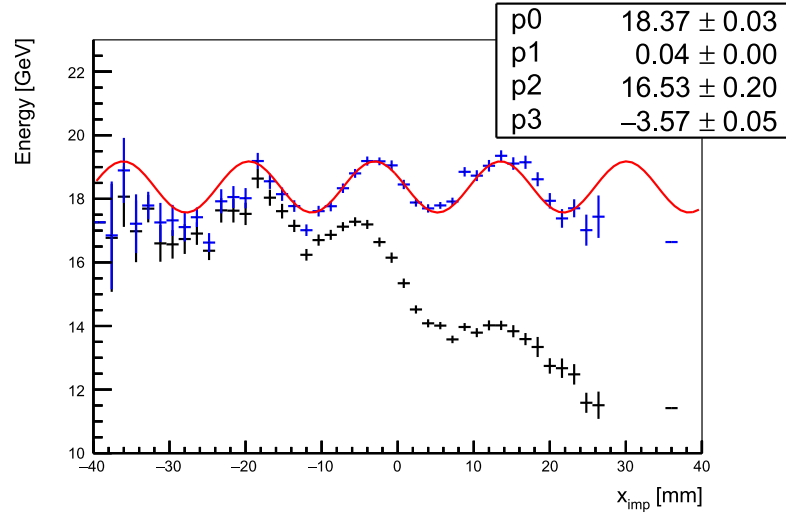
1.1	Systém urýchlovačov v CERN-e.	4
1.2	Ilustrácia polohy a veľkosti LHC.	5
2.1	Ilustrácia detektoru atlas, jeho súčastí a rozmerov.	7
2.2	Ilustrácia interakcie častíc v rôznych častiach detektoru atlas. . .	8
2.3	Ilustrácia prierezu systému kalorimetrov.	10
3.1	Schematická ilustrácia modulu kalorimetra Tilecal.	13
3.2	Usporiadanie buniek a radov scintilačných doštičiek modulu kalori- metra Tilecal.	13
3.3	Fit výšok pulzu nameraných v 25 ns intervaloch.	14
4.1	Usporiadanie modulov kalorimetra Tilecal.	15
4.2	Schéma experimentálneho usporiadania predradených detektorov. .	15
5.1	Odozva pred výberom udalostí.	18
5.2	Signál zo zväzkových scintilátorov.	19
5.3	Rozbiehavosť testovacieho zväzku.	19
5.4	Spektrum Čerenkovych detektorov.	21
5.5	Zmena v odozve po orezaní podľa predradených detektorov. . . .	22
5.6	Spektrum priečného a pozdĺžneho profilu.	23
5.7	Kombinácia parametrov C_{long} a C_{tot}	23
5.8	Zmena v odozve po orezaní hadrónov.	24
5.9	Počty a podiely udalostí po jednotlivých rezoch.	24
6.1	Odozva kalorimetra na elektróny.	26
6.2	Závislosť $E(x_{\text{imp}})$ vo všetkých uvažovaných bunkách.	26
6.3	Závislosť $\langle E(z) \rangle$	27
6.4	Závislosť $\lambda(z)$	29
6.5	Závislosť $E_{\text{fit}}/E_{\text{beam}}$ na energii zväzku.	29
6.6	Závislosť rozlíšenia kalorimetru na strednej hodnote energie. . . .	30
6.7	Rozdelenie E_{corr}	32
6.8	Závislosť korekcie rozlíšenia kalorimetru na strednej hodnote energie. .	32
A.1	Aperiodická závislosť $E(x_{\text{imp}})$ a jej oprava.	37

A. Prílohy

A.1 Oscilácia signálu

Pri dátových súboroch, v ktorých bola poloha dopadu z príliš blízko okraju testovanej bunky, modulácia energie nevykazovala periodický charakter. V grafe na obrázku A.1 je vidieť, že čím viac sa poloha dopadu zväzku blíži k okraju testovanej bunky, tým aperiodickejší je signál v bunke kalorimetra, do ktorej dopadal testovací zväzok. V záporných polohách x_{imp} je možné vidieť náznak sínusovej modulácie.

Tento tvar signálu je možné vysvetliť tým, že časť testovacieho zväzku dopadala do vedľajšej bunky kalorimetra, konkrétne do bunky A2. V grafe na obrázku A.1 je preto znázornený signál sčítaný z oboch buniek, A3 + A2. Je vidieť, že tento súčet už vykazuje periodickú moduláciu energie.



Obr. A.1: Závislosť deponovanej energie v bunke A3 (čierna), do ktorej dopadal testovací zväzok v polohe $z = -100.5$ mm, na polohe dopadu x_{imp} . Modrou farbou je znázornená táto závislosť s pričítaním vedľajšej bunky A2. Červenou farbou je znázornený fit funkciou 6.1.